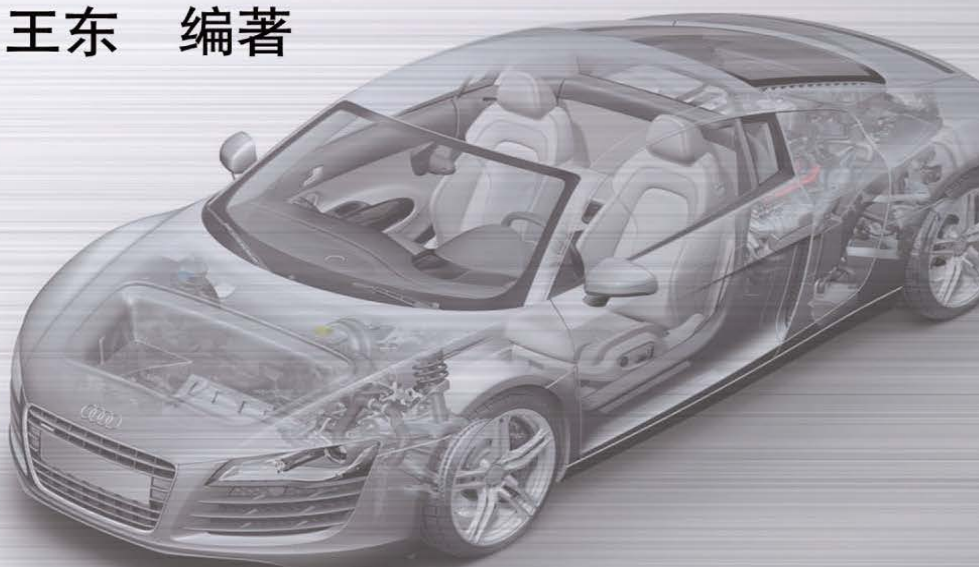




汽车零部件热处理 实用技术

QICHE LINGJIAN RECHULI
SHIYONG JISHU

王忠诚 王东 编著

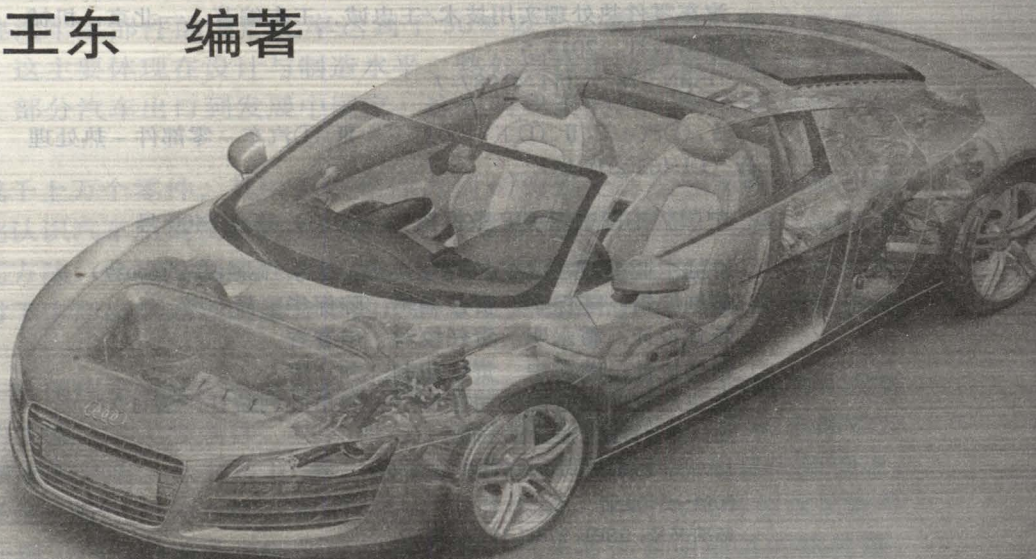


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车零部件热处理 实用技术

QICHE LINGJIAN RECHULI
SHIYONG JISHU

王忠诚 王东 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书系统地介绍了汽车零件热处理技术, 主要包括: 汽车零件的材料与热处理特点、曲柄连杆系统零部件的热处理、配气机构系统零部件的热处理、传动系统零部件的热处理、行驶系统零部件的热处理、转向系统与制动系统零部件的热处理、其他零件的热处理、汽车零件常用模具的热处理、汽车零件先进的热处理技术与应用、汽车零部件先进热处理设备。本书内容丰富, 图文并茂, 注重与实践相结合, 实用性强。

本书适用于热处理工程技术人员、工人阅读使用, 也可供相关专业在校师生与科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车零件热处理实用技术/王忠诚, 王东编著. —北京: 机械工业出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-111-41987-7

I. ①汽… II. ①王…②王… III. ①汽车—零部件—热处理
IV. ①U463②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 062400 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华 吕 芳

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 路恩中 责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·24.75 印张·494 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-41987-7

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑 (010) 88379734

社服 务 中 心: (010) 88361066

网络服务

销 售 一 部: (010) 68326294

教 材 网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

读者购书热线: (010) 88379203

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面防伪标均为盗版



前言

在众多的交通运输工具中，汽车是主要的交通运输工具，无论客运还是货运都具有便捷、迅速、经济和舒适等特点，在人们的日常生活中占有十分重要的地位。近十几年来，我国汽车制造的整体水平与世界发达国家的汽车制造企业的差距逐渐缩小，在先进制造技术引进和汽车零部件的消化吸收方面，已经迈出了可喜的一步，关键汽车零部件的国产化率达到了 50% 以上，我国汽车制造技术取得了质的飞跃，这主要体现在设计与制造水平、热处理技术与质量保证能力等方面得到了提升，部分汽车出口到发展中国家，这表明我国的汽车制造能力有了长足的进步。

汽车上有成千上万个零件，其中钢铁零件占到 67% 以上，这些零件大部分需要热处理，因此认识汽车用钢铁材料的特性和主要零件的加工方法，选择正确与先进的热处理工艺方法，合理选择热处理设备，分析常见零件的失效方式从而提出预防性措施等，对于生产出热处理质量合格的产品是至关重要的，也是提高汽车整体性能的基础。

本书立足于我国汽车制造行业零件热处理的现状，以关键汽车零件的热处理实用技术为全书的主线，从工作条件、材料选用、热处理的具体要求、设备选择等方面分类进行了详细的介绍。全书共 10 章，主要包括汽车零件的材料与热处理特点，汽车曲柄连杆系统、配气机构系统、传动系统、行驶系统、转向系统与制动系统等关键零件的热处理，汽车用轴承和标准件的热处理，汽车零件常用模具的热处理，主要热处理技术与热处理设备的特点，同时指出零件热处理的发展方向是清洁、高效、节能、安静、环保和无氧化脱碳。

本书围绕汽车关键零件的热处理实用技术编写而成，注重与实践相结合，是一本实用性很强的热处理技术书籍，可供汽车零件制造行业的热处理工程技术人员、工人阅读使用，也可供相关专业在校师生与科研人员参考。

本书由王忠诚、王东编著。在编写过程中承蒙山东大学齐宝森教授的指导与帮

助，山东安丘亚星热处理材料有限公司刘建华总经理、中国重汽集团公司张福增高级工程师、济南昌达热工有限公司张学礼总经理等提供了部分资料，另外，参考引用了众多专家与学者的文献资料、图表等，在此一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者和专家批评指正。

作 者



目 录

前言

第1章 汽车零件的材料与热处理特点 1

1.1 汽车用钢的要求与选材	1
1.1.1 汽车用钢的种类	1
1.1.2 高强度钢板及应用	2
1.1.3 汽车零件结构及加工工艺特点对材料的技术要求	3
1.1.4 汽车主要零件的选材	4
1.2 汽车零件热处理特点	7
1.2.1 汽车零件的整体热处理特点	7
1.2.2 汽车零件的常见基本热处理特点	8
1.2.3 汽车零件的表面热处理特点	9
1.2.4 汽车零件的化学热处理特点	13
参考文献	17

第2章 曲柄连杆系统零部件的热处理 18

2.1 概述	18
2.1.1 工作条件与作用	18
2.1.2 零件的主要热处理方法与特点	20
2.2 活塞连杆机构的热处理	21
2.2.1 活塞	21
2.2.2 活塞环	23
2.2.3 活塞销	27
2.2.4 活塞杆	32

2.2.5 连杆·····	34
2.3 曲轴飞轮机构的热处理·····	38
2.3.1 曲轴·····	38
2.3.2 飞轮·····	51
参考文献·····	51
第③章 配气系统零部件的热处理·····	53
3.1 概述·····	53
3.1.1 气门组的构成与作用·····	53
3.1.2 气门传动组的构成与作用·····	55
3.1.3 柴油机针阀体的作用·····	56
3.2 气门组零件的热处理·····	56
3.2.1 气门·····	56
3.2.2 气门导管·····	80
3.2.3 气门座(镶块式铸造气门座)·····	81
3.2.4 气门弹簧·····	83
3.3 气门传动组零件的热处理·····	87
3.3.1 凸轮轴·····	87
3.3.2 气门挺杆·····	96
3.3.3 推杆、摇臂和摇臂轴·····	112
3.3.4 曲轴链轮和链条·····	115
3.4 柴油机针阀体的热处理·····	117
参考文献·····	123
第④章 传动系统零部件的热处理·····	125
4.1 概述·····	125
4.2 变速器等齿轮的热处理·····	126
4.2.1 钢制齿轮的热处理·····	126
4.2.2 球墨铸铁齿轮的热处理·····	152
4.2.3 齿轮的表面强化处理·····	153
4.2.4 齿轮制造过程中常见缺陷及其原因分析·····	154
4.2.5 齿轮在使用过程中的损坏形式和特征·····	155
4.3 万向传动装置的热处理·····	158
4.3.1 十字轴的热处理·····	158
4.3.2 汽车传动轴(或中间轴)的热处理·····	159

4.4 汽车半轴的热处理	161
4.5 汽车稳定杆的热处理	172
参考文献	174
第5章 行驶系统零部件的热处理	176
5.1 概述	176
5.2 转向节、转向节主销和前轴等的热处理	178
5.2.1 汽车转向节	178
5.2.2 汽车转向节用球头支承	180
5.2.3 汽车转向节主销	181
5.2.4 40Cr 球头销	183
5.2.5 转向拉杆球头销或上下臂控制球头销	183
5.2.6 拉销	184
5.2.7 钢板弹簧支承销	185
5.2.8 汽车前轴	186
5.3 悬架(弹性元件)的热处理	186
5.3.1 汽车钢板弹簧	187
5.3.2 其他悬架弹簧	195
5.4 轮辋和轮毂的热处理	199
5.4.1 轮辋(或钢圈)	200
5.4.2 轮毂	200
参考文献	203
第6章 转向系统与制动系统零部件的热处理	204
6.1 概述	204
6.2 转向操纵机构的热处理	208
6.3 转向传动机构的热处理	209
6.3.1 转向横拉杆	209
6.3.2 转向纵拉杆	209
6.3.3 部分转向部件	211
6.4 制动(摩擦)片和制动凸轮的热处理	212
参考文献	217
第7章 其他零件的热处理	218
7.1 概述	218

7.1.1 轴承的作用与要求	218
7.1.2 紧固件等零件成型的方法与特点	220
7.2 轴承的热处理	221
7.3 标准件（螺母、螺栓和销轴等）的热处理	242
参考文献	255
第⑧章 汽车零件常用模具的热处理	257
8.1 概述	257
8.1.1 模具的作用与热处理	257
8.1.2 模具失效的形式与原因	258
8.1.3 模具材料的类别	258
8.1.4 表面强化方法与真空热处理的应用	258
8.1.5 模具表面强化方法的选用原则	264
8.1.6 模具热处理缺陷分析与基本措施	266
8.1.7 提高挤压模具使用寿命的途径与手段	269
8.1.8 控制模具热处理变形的措施	272
8.2 气门锻模与挺杆挤压模的热处理	274
8.2.1 气门锻模	274
8.2.2 挺杆挤压模	284
8.3 弹簧夹头与弹簧钢板冲孔模的热处理	287
8.3.1 弹簧夹头	287
8.3.2 弹簧钢板冲孔模	290
8.4 汽车转向节锻模的热处理	294
8.5 曲轴与连杆锻模的热处理	298
8.5.1 曲轴锻模	298
8.5.2 连杆锻模	300
8.5.3 H13 钢曲轴锻模与连杆锻模	303
8.6 凸轮轴锻模的热处理	305
参考文献	306
第⑨章 汽车零件先进的热处理技术与应用	308
9.1 概述	308
9.1.1 汽车零部件的热处理技术	308
9.1.2 汽车零件的保护加热技术	310
9.1.3 汽车零件的表面改性、形变热处理与复合热处理技术	311

9.1.4 汽车零件现代热处理技术的主要发展趋势	312
9.2 激光热处理	313
9.2.1 激光热处理的原理和特点	313
9.2.2 激光热处理的应用	315
9.3 形变热处理	319
9.3.1 形变热处理的类型与特点	320
9.3.2 形变热处理的工艺与应用	323
9.4 复合热处理	325
9.4.1 表面合金化 + 淬火	326
9.4.2 表面硬化 + 回火温度下的表面化学热处理	328
9.5 真空热处理	329
9.5.1 真空热处理的发展与特点	329
9.5.2 真空热处理技术的发展趋势	331
9.5.3 真空热处理工艺与应用	332
9.5.4 影响工件真空热处理质量的因素	335
9.5.5 典型零件的真空热处理	335
参考文献	339
第10章 汽车零部件先进热处理设备	340
10.1 概述	340
10.1.1 热处理设备的分类与特性	340
10.1.2 汽车零件对热处理设备的要求	342
10.2 真空热处理炉	343
10.2.1 真空炉的发展概况	343
10.2.2 真空炉的种类、特点、应用及主要技术参数	344
10.3 连续式保护气氛炉	350
10.3.1 概述	350
10.3.2 网带式保护气氛连续作业炉	355
10.3.3 振底式保护气氛连续作业炉	359
10.3.4 推杆式保护气氛连续作业炉	362
10.4 燃气高温炉	366
10.5 感应加热设备	371
10.6 流动粒子炉	374
10.7 离子渗氮炉	379
参考文献	384

第 1 章

汽车零件的材料与热处理特点



1.1 汽车用钢的要求与选材

通常汽车约由三万多个零件组成，材质以金属材料为主。其中，钢铁材料约占汽车总质量的 80% 左右，非铁金属材料占 3% ~ 4.7%。汽车中的钢铁材料主要包括钢板（约占 50%）、新型弹簧钢（悬架系统用硅钢板）、低合金微调质钢（含有 V、Ti、Nb）、高性能钢板、镀覆钢板、齿轮用钢等。非铁金属材料主要有铝合金、铝基复合材料、镁合金材料和钛合金材料等，可用于制造车轮、气门座圈、排气系统部件等。另外，还有铁基粉末冶金材料，可用于制造轴承、进排气门、凸轮、齿轮和支架等。

由于钢铁材料具有强度高、成本低、加工难度小、生产工艺成熟（易铸造、易成形、易切削加工和易焊接）、容易回收和再利用等优点，故成为汽车制造中最重要的材料。

非铁金属材料中的轻金属具有材质轻、导电性好等特性，在汽车制造中应用量呈上升趋势，如铝、镁、钛等材料可减轻汽车质量，是提高节能性和环保型的首选材料，另外，具有比强度和比刚度均高、易加工成形、阻尼减振性和电磁屏蔽性强、废料易回收等特点。因此，非铁金属材料是汽车制造业必不可少的材料。

汽车材料的选用应符合以下要求：承受正常工作所产生的应力与应变，具有低的材料成本和加工成本，不破坏环境并可回收。

1.1.1 汽车用钢的种类

用于制造汽车的钢材品种主要包括型钢、热轧中板、热轧薄板、钢带、优质钢材和钢管等，其中以薄板与优质钢材为主。

热轧钢板主要用于载货汽车车架纵梁、横梁、车厢横梁、车轮轮辐，轿车车轮

轮辋与轮辐等。热轧薄板用于制造车身，其要求钢板成形性能良好、表面质量好。轿车车身采用电镀锌板、热镀锌板等。优质钢材包括碳素结构钢、合金结构钢、弹簧钢、易切削钢、冷锻钢、耐热钢等，其中以齿轮钢用量较大。表 1-1 为我国汽车用钢铁材料种类及其比例。

表 1-1 我国汽车用钢铁材料种类及其比例 (%)

钢板	合金 结构钢	碳素 结构钢	弹簧钢	钢带	型钢	钢管	冷锻钢	非铁 金属制品	易切 削钢	耐热钢	其他
50	9.6	8.7	7.5	6.5	6	3	2.1	1	0.9	0.3	4.4

1. 冷轧板、带

冷轧钢带是制造汽车覆盖件与车体内部加强板、防护板、连接板以及梁等最主要的材料，其他应用板材多为冷轧板及镀锌板，轿车的冷轧板用量为 450 ~ 550kg。

冷轧板在客车上用作蒙皮，在小型和微型客车上主要用于外覆盖件与加强板和梁等。

冷轧板在载货汽车上用作外盖板、顶盖板、翼子板、保险杠以及内板等。

2. 热轧板

轿车采用热轧薄板制造垫板、支架、冲击桥壳以及轮辋和轮辐等；客车用热轧薄板制造各种支架和底座等；载货汽车用热轧薄板制造车架和车厢横、纵梁等。

1.1.2 高强度钢板及应用

该类钢板是指经过固溶强化、析出强化、晶粒细化强化和应变组织强化的组合设计，并能满足强度和加工性能要求的材料，其强度与相对密度的比值高于相应的传统材料，通常将抗拉强度在 370MPa 以上的热轧钢板和 340MPa 级以上的冷轧钢板称为高强度钢板。

1. 分类

高强度钢板可按冲压级别、生产工艺、强化机理和屈服强度进行分类，通常按生产工艺分为冷轧高强度钢板和热轧高强度钢板。冷轧高强度钢板用于汽车车身零件，如车门、发动机外罩板和内罩板以及车身结构件等；热轧高强度钢板则用于制造载货车横纵梁、车轮、制动盘等。

2. 高强度钢板的应用

汽车外板，如发动机机罩、车门、行李架、侧围外板等，应用了 340MPa 级烘烤硬化型钢板（BH 钢板）和 440MPa 级高强度材料，车身骨架部件采用 440MPa 和 590MPa 级别的高强度材料，结构支撑件材料的级别已达 800 ~ 1000MPa，制造前后保险杠、横纵梁和柱等。车身主要部位采用热成形钢板可大大提高车身强度。有资料指出，高强度钢板在汽车上的使用率将超过 70%。

1.1.3 汽车零件结构及加工工艺特点对材料的技术要求

表 1-2 为汽车部件分类及对钢材的技术要求。

表 1-2 汽车部件分类及对钢材的技术要求

类 别	代表零件名称	特 性 要 求	主要板厚控制要求
面板部件	外板、车门与内板、车底板等	成形性、刚性、抗凹陷性、耐腐蚀性	拉伸刚性、冲击吸收能量和疲劳强度
结构部件	构件、发动机罩等	成形性、刚性、冲击吸收能量、疲劳强度、耐腐蚀性和焊接性	拉伸刚性、冲击吸收能量和疲劳强度
行走部件	下部支架、车轮等	成形性、刚性、疲劳强度、耐腐蚀性和焊接性	刚性和疲劳强度
增强部件	前后防撞件、横梁等	成形性、焊接性和冲击吸收能量	冲击吸收能量

1. 车身对钢材的要求

汽车用钢材（包括热轧钢板、冷轧钢板和镀层板等）是汽车上的主要原材料，减轻汽车自重的高强度钢板主要用于汽车外壳和结构件，主要有汽车表面用钢板和汽车车体用钢板。汽车车身使用的材料主要有薄钢板、镀锌薄钢板、薄铝板、合金板等。

2. 车轮对钢材的要求

汽车车轮轮辋经下料卷圈、闪光对焊、水冷、去飞边、扩口、滚形扩展、打充气孔等工序完成；轮辐则经过正拉深、反拉深、镢形整形、冲孔、修边、冲螺栓孔、挤球形翻边等工序完成，最后采用 CO₂ 保护焊将轮辋和轮辐组装成车轮。

3. 齿轮对钢材的要求

为解决齿轮损伤问题，对齿轮用钢进行二硫化钼的涂覆等润滑处理，同时应采用高强度和无需润滑处理的材料等。

4. 连杆对钢材的要求

要求连杆具有良好的综合力学性能，其应采用调质钢制造，也可采用非调质钢等代替碳素结构钢来制造汽车发动机连杆。

5. 弹簧对钢材的要求

从传统材料的 1000MPa 级向 1200 ~ 1300MPa 级的高强度化方向发展，在实现弹簧高强度化的过程中，同时考虑到永久变形性、疲劳强度、腐蚀环境下的疲劳寿命等，即高弹性与高的疲劳极限的有机结合，通常选用的材料有 65Mn、

60Si2MnA、50CrVA 等。气门弹簧的钢丝疲劳寿命要求达到 2300 万次，因此对弹簧钢丝的生产稳定性要求十分苛刻。

6. 气门对钢材的要求

要求气门材料在工作条件下，耐热、耐腐蚀、抗氧化及耐磨，且具有良好的导热性，即具有良好的综合力学性能。

7. 冷锻件对钢材的要求

汽车用紧固件（如螺栓、螺钉和螺母等）的工作条件较差，工作应力明显提高，要求紧固件用钢具有更高的强度。常用冷锻钢的强度级别为 700 ~ 1000MPa，目前其要求提高到了 1100MPa 以上，同时也提出了抗延伸破坏性能、耐蚀性和加工性能等方面的要求。

对于抗拉强度超过 1200MPa 的螺栓，在静态应力作用下，经过一定时间会出现延迟断裂，为此需要采取减少晶界偏析、细化晶粒和提高回火温度等措施。

1.1.4 汽车主要零件的选材

1. 发动机缸体、缸盖和缸套

考虑到发动机的缸体、缸盖要承受燃烧过程中高温、高压和高速运动件的振荡力和摩擦磨损，同时要承受重力以及螺栓拧紧时局部巨大的压应力等作用，其应具有较高的强度、良好的铸造性能和机械加工性能，缸体材料多采用灰铸铁（HT200 或 HT250）和铝合金等。轻型化和小型车的缸体、缸盖多采用铝合金，用铸铝件代替铸铁件。

缸套采用耐磨材料，一般采用高磷铸铁、硼铸铁、合金铸铁等耐磨铸铁等制造，采用镀铬、表面淬火、喷镀金属或其他耐磨合金的方法对缸套进行表面处理，目的是提高其耐磨性。

2. 发动机曲轴

发动机曲轴在工作中承受弯曲、扭曲、剪切、拉压、冲击等交变应力的作用，其主要失效形式为疲劳断裂和轴颈磨损等，锻造曲轴和铸造曲轴采用的材料是不同的，锻造曲轴一般采用中碳钢和中碳合金钢制造，如 30、45、35Mn2、35CrMo、40Cr 等。铸造曲轴多采用铸钢、球墨铸铁、珠光体可锻铸铁及合金铸铁等，如 ZG230-450、QT600-3、QT700-2、KTZ450-06、KTZ550-04 等。

3. 活塞组件

在发动机运转过程中，活塞组件受到周期性变化的高温高压燃气的作用，其工作温度高达 2000℃，同时在气缸内高速往复运动时产生很大的惯性力，并承受交变侧向力，工作条件十分苛刻。

（1）活塞材料 要求活塞材料具有耐热性和导热性好，吸热少，膨胀系数小，减摩性、耐磨性、耐蚀性和工艺性好的特点。由于铝合金导热性好、密度小，而硅

能使膨胀系数减小,提高耐磨性和耐蚀性,并能提高强度、硬度和刚度等,故活塞材料常选用硅铝合金,并进行固溶处理和时效处理。

(2) 活塞环材料 要求耐磨性与耐热性好、韧性佳、易磨合,并具有良好的加工性能。目前活塞环多采用以珠光体为基体的灰铸铁,或采用在灰铸铁中加入一定数量的铜、铬、钼、钨等元素的合金铸铁,也可采用球墨铸铁或可锻铸铁。为了提高活塞环的使用寿命,还要进行镀铬、喷钼、磷化、氧化等表面处理,目前应用十分广泛的为表面镀铬,可提高寿命2~3倍。

(3) 活塞销材料 要求具有足够的刚度、强度和耐磨性,并具有较高的疲劳强度和韧性,一般选用20、20Cr、18CrMnTi等低碳合金钢(渗碳钢),并进行渗碳或液体碳氮共渗的表面处理,以满足其工作需要。

4. 气门

气门在发动机内工作时,承受较大的机械载荷、热负荷和相当大的冲击,要求具有良好的密封性,因此要求材料具有耐热性、耐磨性、耐蚀性等特点。因进、排气门的工作条件不同(进气门工作温度为300~400℃,排气门则达到650~850℃),故选用的材料不同。按QC/T 469—2002《汽车发动机气门技术条件》可知,进气门采用合金结构钢和部分马氏体耐热钢,而排气门则选用马氏体耐热钢、奥氏体耐热钢以及高温合金等。

5. 齿轮

汽车用齿轮数量较多,其受力较大、冲击频繁,主要失效形式为齿面磨损、疲劳断裂、齿面接触疲劳破损等,故要求材料具有很高的强度和疲劳强度,并具有良好的冲击韧度和耐磨性。目前国内汽车齿轮用材多选用20Cr、20CrMnTi等合金渗碳钢,并进行渗碳、淬火以及低温回火处理等,个别采用等温淬火球墨铸铁材料制造。

6. 螺栓、铆钉等连接零件

螺栓、铆钉等连接零件主要起连接、紧固、定位等作用,连接零件不同,工作条件和受力也不同,故材料的选用是不同的。通常螺栓、铆钉等连接零件采用一般冷锻钢材,而高强度螺栓采用回火马氏体钢和贝氏体钢。

7. 半轴

半轴主要承受扭转力矩和一定的冲击载荷,要求其材料具有较高的综合力学性能,即具有很高的抗弯强度、疲劳强度和良好的韧性。通常半轴采用调质钢,并进行喷丸处理及滚压凸缘根部圆角强化处理。一般中小型汽车半轴采用45和40Cr钢,重型汽车则采用40MnB、40CrNi、40CrMnMo等淬透性较高的合金钢。

汽车主要零件(发动机与底盘)的材料选用情况见表1-3。

表 1-3 汽车主要零件（发动机与底盘）的材料选用情况

汽车主要零件名称	材料类别及牌号	使用性能要求	主要失效形式	热处理及其他处理方式和要求
发动机缸体、缸盖、飞轮、正时齿轮	灰铸铁：HT200	刚度、强度、尺寸稳定性	裂纹、孔壁磨损、翘曲变形	不处理或去应力退火，也可用 ZL104 铝合金作缸体、缸盖，固溶后时效处理
缸套、排气门座	合金铸铁	耐磨性、耐热性	磨损	铸造状态
曲轴	球墨铸铁：QT600-3	刚度、强度、耐磨性	磨损、断裂	表面淬火、圆角滚压、渗氮，也可用锻钢件
活塞销等	渗碳钢：20、20Cr、18CrMnTi、12Cr2Ni4	强度、冲击韧度、耐磨性	磨损、变形、断裂	渗碳、淬火、低温回火
连杆、连杆螺栓、曲轴	调质钢：45、40Cr、40MnB	强度、疲劳强度、冲击韧度	变形、断裂	调质处理、无损检测
各种轴承、轴瓦	轴承钢、轴承合金	耐磨性、疲劳强度	磨损、变宽、氧化烧蚀	淬火、低温回火
进、排气门	马氏体耐热钢：40Cr10Si2Mo 等 奥氏体耐热钢：53Cr21Mn9Ni4N 等	耐磨性、耐热性、耐蚀性	氧化烧蚀、（锁夹槽、颈部、盘部）断裂、盘部变形、锥面掉块、杆端面磨损	淬火、高温回火，或固溶处理、时效处理，表面处理为渗氮、镀铬等
气门弹簧	弹簧钢：65Mn、50CrVA	疲劳强度	变形、断裂	淬火、中温回火，喷丸强化
活塞	高硅铝合金：ZL108、ZL110	耐热强度	烧蚀、变形、断裂	固溶处理、时效处理
发动机支架、盖、罩、挡板、油底壳等	钢板：Q235、08、20、16Mn	刚度、强度	变形	不进行热处理
纵梁、横梁、传动轴、钢圈等	钢板：25、16Mn	强度、刚度、韧性	弯曲、扭斜、铆钉松动、断裂	要求用冲压工艺性能好的优质钢板
前桥（前轴）转向节臂、半轴等	调质钢：45、40Cr、40MnB	强度、韧度、疲劳强度	弯曲变形、扭转变形、断裂	模锻成形、调质处理、圆角滚压、无损检测

(续)

汽车主要零件名称	材料类别及牌号	使用性能要求	主要失效形式	热处理及其他处理方式和要求
变速器齿轮、后桥齿轮等	渗碳钢：20Cr、20CrMnTi 中碳钢：45、40MnB	强度、耐磨性、接触疲劳强度、断裂强度	麻点、剥落、齿面磨损、变形、断齿	渗碳（深度 0.88mm 以上）淬火、低温回火、表面硬度 58 ~ 62HRC，调质或表面淬火
变速器壳、离合器壳	灰铸铁：HT200	刚度、尺寸稳定性、一定的强度	裂纹、轴承孔磨损	去应力退火
后桥壳等	可锻铸铁：KT350-10 球墨铸铁：QT400-15	刚度、尺寸稳定性、一定的强度	弯曲、断裂	后桥还可采用钢板冲压后焊接或用铸钢
钢板弹簧	弹簧钢：65Mn、60Si2Mn、55SiMnVB	耐疲劳、冲击和腐蚀	折断、弹性减退、弯度减小	淬火、中温回火、喷丸强化
驾驶室、车厢罩等	08 钢板、20 钢板	刚度、尺寸稳定性	变形、开裂	冲压成形
制动分泵活塞、油管	非铁金属：铝合金、纯铜	耐磨性、强度	磨损、开裂	

1.2 汽车零件热处理特点

汽车零件用材料包括钢铁材料、非铁金属及其他高温合金材料等，其中大部分材料只有通过热处理，才能达到改变材料性能，即改善其硬度、强度和可加工性的目的。材料的性能取决于组织结构、碳含量和合金元素的成分等，因此根据汽车零件的服役条件与技术要求，选择合理的热处理设备与工艺，达到延长汽车零件使用寿命、提高力学性能的目的。

汽车零件的热处理技术要求决定了其采用的热处理工艺与特点。目前汽车制造对零件的热处理提出了具体的要求，除材料本身外，还提出了具体的热处理工艺手段，故汽车制造一直是热处理技术的主要应用领域，各种热处理技术得到了广泛应用。

1.2.1 汽车零件的整体热处理特点

汽车零件材料要达到使用技术要求，则必须进行合理选材与必要的热处理，一

般零件的热处理包括退火、正火、淬火与回火、固溶与时效等，其是依据零件的服役条件来选择的。

1) 退火工序多用于铸铁（合金铸铁）件的热处理，如去应力退火、低温退火等，以消除铸造后的内应力与加工应力等，确保零件尺寸的稳定与后续加工。通常包括灰铸铁缸体、缸盖、飞轮、变速器壳、离合器壳、后桥壳等，它们的退火温度均低于 650°C ，无组织的转变，通常采用箱式炉、推杆炉、振底炉、台车炉等作为加热设备，生产率不高。

2) 正火工序则用于钢制曲轴、前轴、转向节、半轴、二轴、变速器齿轮、后桥齿轮等零件的锻造后处理，目的是提高基体的表面硬度与心部强度，便于进行机械加工，获得要求的力学性能，满足使用要求。正火多采用大型箱式炉、台车炉、推杆炉等，少数采用盐浴炉、井式炉等，冷却方式多为空冷、喷雾冷却等，获得的组织通常为 F + P。

3) 淬火与回火用于渗碳齿轮与活塞销、钢制钢板弹簧与气门弹簧、马氏体钢制气门、前轴、转向节、半轴等零件的热处理，包括低温回火、中温回火与高温回火等，获得要求的力学性能与表面硬度等，是最为常见的热处理工艺方法。通常采用可控气氛加热设备，防止零件表面的氧化脱碳，如保护气氛网带炉、振底炉、多用炉（箱式炉），具有生产率高、质量稳定性好、机械化与自动化程度高、工作环境清洁等特点，因此应用十分广泛。

调质处理是比较常见的热处理工艺，由于汽车零件是大批量生产的，故多选用网带炉、铸链炉进行热处理，调质处理既可作为预备热处理，也可作为最终热处理，处理后的零件具有良好的综合力学性能。

4) 固溶与时效用于非铁金属与合金、奥氏体耐热钢等零件的热处理，以获得要求的力学性能或满足特殊的服役要求，如用于铸造铝合金制缸体与缸盖、活塞、奥氏体钢制气门等，是一类比较特殊的热处理工艺。采用的加热设备通常为盐浴炉、高温燃气炉、高温保护气氛炉、井式炉、多用炉等，均为周期性作业炉，具有劳动强度大、效率低等特点，用于特殊零件的热处理。

1.2.2 汽车零件的常见基本热处理特点

1. 调质处理

汽车零件的调质热处理可分为保护气氛调质热处理和一般调质热处理。保护气氛热处理能够保证零件在热处理过程中不会产生表面氧化、脱碳等缺陷，确保零件的表面质量。当调质处理后零件工作面需要后续加工时，采用一般热处理。根据零件的质量、大小，调质热处理设备有网带炉、铸链炉、料盘（料筐）推杆式炉、托架炉、悬挂式连续炉等。调质处理后的组织为回火索氏体，不允许有块状的铁素体，否则会降低零件的强度和韧性等，通常零件调质处理的硬度为 $30 \sim 38\text{HRC}$

(283 ~ 350HBW), 以汽车紧固件热处理为例, 调质热处理技术的发展主要有以下几方面:

(1) 炉型 由于辐射管和网带寿命的大幅度提高, 在国内标准件行业网带炉得到普遍应用。网带炉具有炉内布料、加热均匀, 零件质量稳定, 工作环境好等优点。特别是对于高强度螺栓的热处理, 采用网带炉使质量有了可靠保证。

(2) 碳势控制技术 碳势控制技术在保护气氛调质生产线上得到普遍应用。采用碳势控制技术炉内碳势的控制精度可达到 $\pm 0.03\%$, 保证了零件热处理的表面质量。

(3) 计算机技术的应用 通过计算机能够按照工艺设定自动完成工件生产的全过程, 记录、保存工件生产中的各种工艺参数, 具有完善的故障诊断、显示, 安全警示及联锁功能。

(4) 快速淬火油和水基淬火冷却介质的应用 快速淬火油的应用保证了高强度螺栓件的热处理内在质量。水基淬火冷却介质的应用解决了零件淬油不硬、淬水开裂以及零件淬火变形的质量问题。

2. 锻造余热热处理

大部分汽车结构零件采用热锻成形工艺。利用锻造余热实施毛坯的热处理是节能的重要措施。如采用锻造余热等温退火、锻造余热淬火, 可以获得利于后续加工的组织 and 硬度, 省去了再次加热能耗, 节能效果显著。利用锻造余热热处理的零件有各类齿轮毛坯、前轴、转向节、摇臂、花键轴、曲轴、连杆等。对于齿坯的余热等温退火, 为了保证锻造余热热处理的组织、硬度均匀性, 需要严格控制终锻温度、中冷过程、等温温度等。对于余热淬火的零件, 为保证零件的强韧化性能, 除了直接淬火工艺外, 也可以采用预冷至 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$, 完成珠光体转变后, 再次加热至奥氏体化温度的方法。主要目的是细化组织, 获得良好的强韧化性能。

1.2.3 汽车零部件的表面热处理特点

1. 感应热处理

在 20 世纪 30 年代, 出现了感应热处理技术, 感应热处理技术是一项高效、节能、环保的热处理技术, 符合现代工业生产的 3S 和 3C 标准 (Sure 可靠、Safe 安全、Saving 节约及 Cool 低温、Clean 清洁、Clam 安静), 几十年来有了迅速的发展, 特别是在汽车生产方面得到了广泛应用。

从最初的曲轴轴颈感应淬火, 逐渐扩展到汽车发动机、汽车底盘等汽车零件上。我国的感应热处理起步于 20 世纪 50 年代, 首先应用于机床制造业与纺织机械制造业, 其后在汽车制造业、拖拉机及工程机械、轴承工业、石油钻机与化工机械、铁路、重型机械、冶金机械、航空航天、农业机械制造、建筑材料等各

个行业大量采用感应热处理技术。

感应热处理具有节能、高效、环保、劳动强度低、在线作业、自动化程度高等特点，故发展迅速，在国内外得到普遍的应用与推广。

目前典型的零件表面淬火，多应用于传递动力转矩的轴类零件：内燃机气门的杆端与盘锥面、曲轴轴颈、凸轮轴、花键轴、齿轮齿圈、半轴、等速万向节、变速叉、传动器轴、十字轴、齿轮轴、减振器、销轴、轴承座、制动凸轮、转向节等。感应热处理零件占汽车热处理零件的 70% 以上，是比较有前途的热处理工艺。

(1) 感应热处理工艺与应用 感应热处理工艺中应用最多的为淬火，其次为回火与退火或正火。感应热处理工艺的调整是在电源设备（频率及功率已经确定）、淬火机床、感应器（工艺装备件已经具备）、辅助装置（淬火冷却介质浓度、温度等）以及需要淬火调整的零件达到该工序的要求后进行的。感应淬火的工艺方式与适用范围见表 1-4。

表 1-4 感应淬火的工艺方式与适用范围

淬 火 方 式	特 点	淬火冷却介质	适 用 范 围
一次加热法	零件同时加热，一次完成淬火	淬火冷却介质为水、油或聚合物为添加剂的淬火冷却介质，多采用喷液冷却	用于加热面积不太大的零件，如中小型模数齿轮、CVJ 钟形壳杆部、内滚道、拖带轮、支重轮、钢板弹簧销、拨叉、气门杆端部、气门摇臂圆弧部分、半轴、齿轮等
扫描淬火法	零件加热面积大、电源功率较小时采用此方法，适用于小批量生产		大直径活塞、瓦楞辊、轧辊、输油管、抽油杆、钢轨、机床导轨、带台阶的轴等
分段一次加热法	每次加热一个或多个部位，也可逐齿一次淬火		凸轮轴、齿轮等
分段扫描淬火法	在一根轴上的多个部位进行扫描淬火，也可逐齿扫描淬火		气门摇臂轴、变速器叉轴、齿轮等
液体加热淬火法	感应器在淬火冷却介质中加热零件，断电后在淬火冷却介质冷却		要求临界冷却速度较小的钢材零件

感应淬火件回火的目的是降低淬火应力，避免产生淬火裂纹或降低硬度，达到零件的热处理技术要求。感应淬火后的回火有三种方式：自回火、感应回火、炉中回火。

(2) 感应淬火件的质量检验 感应淬火件的质量检验项目与要求见表 1-5。

表 1-5 感应淬火件的质量检验项目与要求

检 验 项 目	具 体 要 求	检 验 方 法	备 注
外观	无烧熔,无明显裂纹、掉圈、崩角等	肉眼或放大镜 100% 检查	
表面硬度	硬度符合工艺要求,软带或软点在要求的范围内	洛氏硬度计、涡流测试仪	也可采用笔式硬度计与内孔硬度计,涡流测试仪可区别材料的性能(合金及显微组织)
硬化区域	小批生产采用直尺与游标卡尺测量,对于调试件采用金相法浸蚀测量,允许有过渡段长度	使用直尺与游标卡尺等测量,每班抽检或按 1% 抽检	采用金相显微镜检测,当有争议时,也可采用硬度法测量硬化区长度
硬化层深度	对试样规定的检验部位进行测量,通常采用金相法检测,按马氏体为 50% 处确定深度	从浸蚀区域的表面向里有明显分界处的长度为硬化层深度	有条件的可采用线切割的方法切割试样,可采用硬度法检测,硬化层深度与极限硬度值有一定的关系,即表面到硬度为要求最小硬度的 0.8 倍处的距离为硬化层深度(GB/T 9451—2005《钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定》)
显微组织	防止过热和防止加热不足等,钢件晶粒度 3~7 级或 3~9 级为合格,球墨铸铁按要求检查	根据马氏体粗细、碳化物溶解以及未熔铁素体大小来判定	其评定方法的依据是 JB/T 9204—2008《钢件感应淬火金相检验》以及 GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》
变形	按要求进行检测,对超过要求的零件进行校正	通用的变形检查工具有平板、塞尺、角尺、卡尺等,专用工具有百分表、专用传感器、周长仪、滚动斜板等	校正时,可选用液压机、螺旋压力机,或采用手动校正等
裂纹	无表面裂纹	采用肉眼或放大镜、煤油浸入后擦拭喷砂以及着色法检查,磁粉无损检测等	可根据零件的大小与数量选择检查方法

2. 火焰淬火

火焰淬火的淬火温度比普通的淬火温度要高 50~70℃,加热速度快,因此工件经火焰淬火后硬化层不厚,不适合处理十分重要的零件。硬化层的深度主要取决

于零件的淬透性、尺寸、加热层深度、冷却条件等因素。一般推荐水压为 0.1 ~ 0.2MPa。整体浸入冷却油中，另外根据零件的硬度也可采用压缩空气、乳化油等淬火冷却介质。

根据加热方式和工件的形状、大小及淬火后要求不同等，火焰淬火有以下四种：静止火焰淬火法、旋转火焰淬火法、推进火焰淬火法与联合火焰淬火法。

火焰淬火工艺参数见表 1-6。

表 1-6 火焰淬火工艺参数

序号	工 艺 参 数	工 艺 数 据							
1	淬火温度	钢件： $Ac_3 + (80 \sim 100) ^\circ\text{C}$ ，一般为 $880 \sim 900 ^\circ\text{C}$ 铸铁件： $[730 + 28w(\text{Si}) - 25w(\text{Mn})] ^\circ\text{C}$							
2	火焰强度	氧乙炔比为 1: (1.1 ~ 1.5)，以 1: (1.15 ~ 1.25) 为最佳 氧气压力一般为 0.15 ~ 0.18MPa 乙炔压力一般为 0.1 ~ 0.15MPa							
3	加热距离	喷嘴与工件表面的距离为 8 ~ 15mm，将火焰调整到中性火焰后，喷嘴与工件表面的间距以保持工件处于火焰的还原焰区为宜							
4	移动速度	调整好喷嘴与工件间距后，将加热起点处加热到 $800 \sim 850 ^\circ\text{C}$ 后，开始移动喷嘴，并调整好移动速度。一般在 $50 \sim 300\text{mm/min}$ 之间，大工件取下限，小工件取上限。移动过程中，要保持加热表面的温度达到奥氏体化温度							
		喷嘴移动速度 /(mm/min)	50	70	100	125	140	150	175
		淬火层 厚度/mm	8	6.5	4.8	3.2	2.6	1.6	0.8
		齿轮模数/mm		5 ~ 10		11 ~ 20		≥ 20	
		喷嘴移动速度 /(mm/min)		120 ~ 150		90 ~ 120		≤ 90	
5	火孔中心与水孔中心的距离	两者之间的距离以 10 ~ 20mm 为宜，水孔向后倾斜 $15^\circ \sim 30^\circ$							
6	淬火冷却介质	水压保持在 0.1 ~ 0.2MPa，聚乙烯醇水溶液质量分数为 3% ~ 5%，整体浸淬可用油，此外还可用乳化油、压缩空气等淬火冷却介质							
7	回火	根据工件最终的硬度选择回火温度，一般火焰淬火的回火较普通淬火的回火温度要低 $20 \sim 30 ^\circ\text{C}$ ，即在炉内进行 $180 \sim 200 ^\circ\text{C}$ 温度的回火处理							

3. 电解液淬火

零件作为阴极浸入电解液中，当电路通以直流电时，电解液发生电解，此时氢离子趋向零件（阴极），在周围形成了氢气膜。由于氢气膜的电阻大，故电流通过

时将产生很大的热量将零件加热（称为阴极效应）。被加热到淬火温度的零件，一旦切断电源立即由电解液迅速冷却而完成淬火，可采用端部自由加热、端面绝缘加热、回转加热和连续加热等方式。

1) 电解液淬火所用的电解液为质量分数为 5% ~ 10% 的碳酸钠水溶液，也可采用 5% ~ 10% 的碳酸钾、氢氧化钠、氢氧化钾、硫酸钠、氯化钙、氯化钡以及硝酸钙等水溶液。

2) 电解液加热所用电压与电流应控制在要求的范围内，电流可通过对总电流及浸入电解液中工件面积的调节来实现。

3) 整个过程中，电解液的温度应控制在 20 ~ 40℃，最高不超过 60℃。

资料介绍，除高频感应淬火可用作内燃机进、排气门杆端的表面淬火外，接触电阻加热淬火也用于该类产品的顶端面淬火。气门的杆部材料为 40Cr，技术要求为杆端淬硬层深度为 2 ~ 4mm，硬度为 45 ~ 62HRC，则具体的工艺参数为：电解液为质量分数为 12% ~ 15% 的碳酸钠水溶液，温度为 30 ~ 60℃，直流电压为 180V，电流为 10 ~ 15A，通电时间为 4.5s。

需要注意的是，在生产过程中，零件表面不得有过热、烧熔、腐蚀以及任何形式的裂纹等缺陷产生；硬化层组织为细小马氏体，晶粒度应不大于 5 级，过渡层为托氏体和索氏体，心部为原始组织。

4. 激光热处理

激光热处理（即激光表面淬火）又称为激光相变硬化，因其具有快速的加热速度与冷却速度，故可获得极细的马氏体组织，此方法适用于碳素钢、中碳低合金钢、铸铁等材料的表面淬火。因此大量用于汽车、拖拉机等发动机的缸体和缸套内壁的处理，以提高其耐磨性和使用寿命，此外，还可用于曲轴、齿轮、模具、刀具、活塞环等的表面硬化处理。

1.2.4 汽车零部件的化学热处理特点

钢铁件化学热处理的目的是改变表层化学成分与组织结构，以提高表面的力学性能、物理与化学性能。

采用化学热处理可有效提高模具表面的耐磨性、抗咬合性、抗氧化性、抗粘着性、抗冷热疲劳性等性能，同时可使零件内部保持原有的强韧性，化学热处理均是以提高零件的耐磨性与使用寿命为目的的。

汽车零部件的化学热处理包括渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗、硫氮碳共渗等，应用比较广泛的为渗碳、碳氮共渗、渗氮与氮碳共渗，其中渗碳与氮碳共渗零件所占比例较大。

1. 渗碳

渗碳热处理的主要目的是使零件获得良好的抗疲劳性能和耐磨性，保证零件的

使用性能与可靠性。同时由于心部与表层的碳含量不同，硬化后的表面获得了有利的残留应力分布，从而提高了渗碳工件的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度。采用渗碳淬火强化热处理的零件有：汽车驱动桥的差速器齿轮、变速器轴齿类零件、转向器轴齿件、发动机活塞销、柴油机针阀体和齿轮零件、部分模具等。十几年来，渗碳热处理技术发展的重要标志是传感技术和计算机技术在生产中的应用。可实现对渗碳热处理工艺参数如温度、时间、碳势，淬火过程以及动作程序的完全自动控制，甚至根据零件的技术要求、材料牌号及特性等，系统可以自动生成工艺，实现智能控制。

汽车零件的渗碳热处理装备有箱式炉，单排、双排、多排连续炉以及真空炉等多种热处理设备。

汽车零件渗碳热处理技术有如下特点：①工业计算机对炉温、碳势、自动线动作程序进行监控与数据自动采集；②对自动线渗碳热处理工艺过程进行自动跟踪与监控，实现渗碳工艺仿真与优化和零件渗碳质量的预测；③对炉内温度、碳势和动作进行实时显示及控制，系统故障自动诊断、显示及报警；④热处理生产工艺的全过程在线自动显示、记录以及保存和建档，可以建立可追踪的热处理质量管理体系。

气体渗碳多用于承受大冲击、高强度和使用硬度在 58 ~ 62HRC 范围内的小型模具、齿轮等。井式炉气体渗碳典型工艺曲线如图 1-1 所示。部分齿轮在井式炉中的典型气体渗碳工艺如图 1-2 和图 1-3 所示。

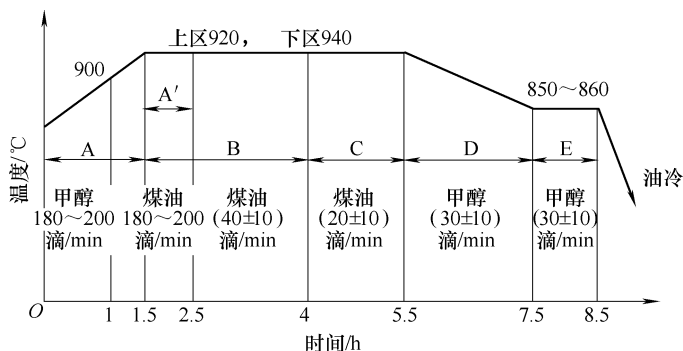


图 1-1 井式炉气体渗碳典型工艺曲线

2. 碳氮共渗

汽车零件碳氮共渗的目的是提高工件的表面硬度、耐磨性和耐疲劳性等，其中应用最广的为中温气体碳氮共渗，其共渗介质为渗碳和渗氮用混合气体，即在井式渗碳炉内滴入煤油（或甲苯、丙酮等），同时通入渗氮用氨气。共渗温度为 820 ~ 860℃，气体碳氮共渗中的碳、氮含量主要取决于共渗温度，即共渗温度越高，共渗层中碳含量越高，氮含量越低；反之共渗温度越低，共渗层中的碳含量越低，氮

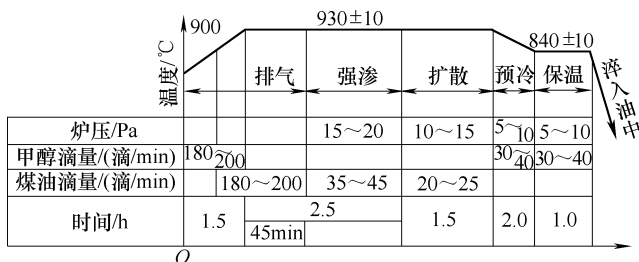
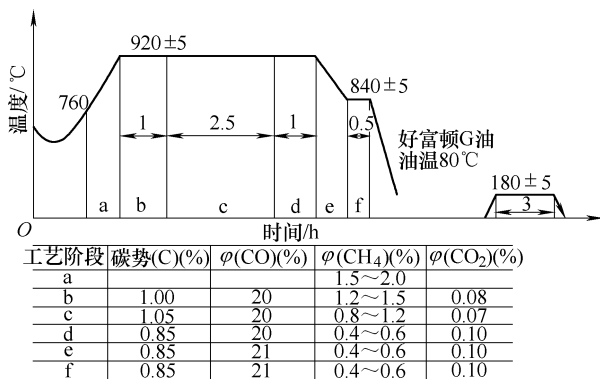


图 1-2 变速器齿轮的气体渗碳工艺规范

注：材料 20CrMnTi，渗层深度为 0.8~1.2mm，RQ3-75-9T。



注：氧探头控制碳势；红外仪测定CO动态补偿；CH₄监视报警；CO₂监视报警。

图 1-3 转向器齿轮的气体渗碳工艺规范

注：材料 20CrMnTi，渗层深度为 0.4mm，可控气氛多用炉。

含量越高。零件完成渗碳、碳氮共渗（排气、强烈渗碳或碳氮、扩散后），对于可直接淬火的零件，可随炉冷却到适宜的淬火温度，并保温一定时间，待零件的内外温度均匀后出炉，而对于需要重新加热的零件，可在出炉后在空气中冷却或放入缓冷罐，为了减少零件的表面氧化、脱碳和变形，也可保持扩散阶段的渗剂流量，并随炉降温至 500~550℃再出炉。

进行碳氮共渗的汽车零件有汽车变速器齿轮、差速器齿轮、部分曲轴、活塞销等。

3. 渗氮

渗氮是将钢件置于含有活性氮原子的气氛中，加热到一定温度保温一定时间，使氮原子渗入工件表面形成渗氮层的热处理工艺。渗氮的目的是提高工件的表面硬度、耐磨性、疲劳强度及耐蚀性。常用的渗氮用钢为 38CrMoAlA、Cr12、Cr12MoV、3Cr2W8V、5CrNiMo、4Cr5MoSiV 等。模具渗氮前应进行调质处理，为了保持模具

的整体性能, 渗氮温度一般不超过调质处理的温度, 一般渗氮温度为 $480 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 。汽车零件进行渗氮的有活塞环、活塞杆、螺杆、部分齿轮等。

4. 氮碳共渗

氮碳共渗后的工件表面形成了化学特性较稳定的渗氮物, 可显著提高工件的耐磨性, 具有良好的抗咬合、抗擦伤能力, 可减轻粘模现象, 另外可明显提高工件的抗疲劳性能, 使工件具有良好的耐蚀性, 一般认为经过氮碳共渗后的工件, 其抗大气腐蚀的能力与发蓝、镀锌件相当, 内燃机气门、曲轴等进行氮碳共渗后, 表面的耐磨性成倍提高, 耐蚀性明显提高, 是一种十分有效的表面强化工艺手段。广泛用于模具 (压铸模具、热挤压模、锤锻模、冲模、塑料模)、曲轴、凸轮轴、气门、挺杆、燃气管等领域, 并取得了令人满意的效果。

图 1-4 所示为选用 TJ-2 氮碳共渗基盐对 3Cr2W8V 钢制气门用热挤压模进行氮碳共渗的工艺曲线, 渗层深度为 $0.10 \sim 0.25\text{mm}$, 表面硬度在 850HV 以上, 使用寿命比气体氮碳共渗提高 80% 。

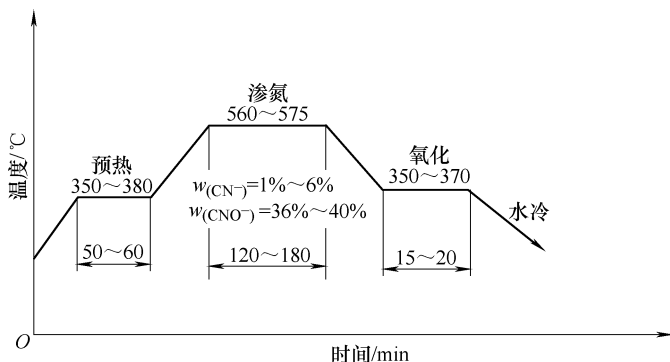


图 1-4 3Cr2W8V 钢制气门用热挤压模氮碳共渗工艺曲线

汽车零件进行氮碳共渗的目的是提高耐磨性、抗擦伤性、耐蚀性和疲劳强度等, 也是一种成本较低且变形小的热处理工艺, 适用于大批量零件的生产, 汽车内燃机气门、气门挺杆、曲轴等均采用了氮碳共渗工艺, 表 1-7 为几种主要氮碳共渗工艺方法的比较, 可以看出液体氮碳共渗具有明显的优势。

表 1-7 几种主要氮碳共渗工艺方法的比较

氮碳共渗工艺	液体氮碳共渗	气体氮碳共渗	离子氮碳共渗	真空氮碳共渗
原料	MCNO	NH_3 + 吸热式气氛	$\text{N}_2 + \text{H}_2$ + 碳氮化合物	$\text{N}_2 + \text{NH}_3 + \text{CO}_2$
处理温度	$550 \sim 600^{\circ}\text{C}$	$400 \sim 600^{\circ}\text{C}$	$400 \sim 600^{\circ}\text{C}$	$400 \sim 600^{\circ}\text{C}$
处理时间	20min ~ 3h	1 ~ 5h	4 ~ 100h	1 ~ 5h

(续)

氮碳共渗工艺	液体氮碳共渗	气体氮碳共渗	离子氮碳共渗	真空氮碳共渗
热处理变形	小	小	小	小
表面状态	疏松层稍厚	普通	致密	致密
生产率	高	高	低	稍低
废弃物	含极少量的氰化盐	N_2 、 CO_2 、 H_2O	N_2 、 H_2 、 H_2O (CO_2)	N_2 、 CO_2 、 H_2O 、 H_2
成本	低	低	高	稍高

参 考 文 献

- [1] 张雷. 汽车材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 王大鹏, 王秀贞. 汽车工程材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 杨满. 实用热处理技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 张玉庭. 实用热处理操作技术问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [6] 潘邻. 表面改性热处理技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 李慕勤, 李俊刚, 吕迎, 等. 材料表面工程技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [8] 王忠诚, 孙向东. 汽车零件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] 袁晓月. 丰田公司汽车零件热处理现状及发展趋势 [J]. 国外热处理, 1997, 18 (4): 8-13.

第 2 章

曲柄连杆系统零部件的热处理



2.1 概述

2.1.1 工作条件与作用

曲柄连杆机构是往复式内燃机中的动力传递系统，是发动机实现工作循环、完成能量转换的主要运动部分。曲柄连杆机构的作用是提供燃烧场所，把燃料燃烧后气体作用在活塞顶上的膨胀压力转变为曲轴旋转的转矩，不断输出动力；将气体的压力变为曲轴的转矩；将活塞的往复运动变为曲轴的旋转运动。

在汽车发动机中，曲轴和连杆是重要的关键部件，该机构由三部分组成：机体组、活塞连杆组和曲轴飞轮组。机体组包括气缸体、气缸盖衬垫、气缸盖、曲轴箱及油底壳、曲轴箱、气缸套等；活塞连杆组包括活塞、活塞环、活塞销、连杆等；曲轴飞轮组包括曲轴、飞轮、曲轴扭转减振器、平衡轴等。

曲轴连杆机构的工作条件比较恶劣，即处于高温、高压和高速以及化学腐蚀状态，在发动机工作时，温度高（ 2000°C ），压力大（ $5 \sim 9\text{MPa}$ ），气门开启频率为 $3000 \sim 6000\text{r/min}$ ，活塞运动速度为 $100 \sim 200\text{m/s}$ ，可燃混合气和燃烧废气接触机件（如气缸、气缸盖、活塞等）造成化学腐蚀。该机构在高压下作变速运动，受力十分复杂，其中有气体的作用力、质量的惯性力、摩擦力以及外界的阻力等。

1. 机体组 机体组主要由气缸体、气缸盖衬垫、气缸盖、曲轴箱及油底壳、曲轴箱、气缸套等部件组成。它构成汽车发动机的骨架，是发动机各机构和各系统的安装基础，其内、外安装着发动机的所有主要零件和附件，承受各种载荷，因此，机体必须要有足够的强度和刚度。

(1) 气缸盖 气缸盖用来封闭气缸，并与活塞顶面构成燃烧室。

(2) 气缸盖衬垫 气缸盖衬垫安装在气缸盖和气缸体之间，用来密封气缸，

防止漏气、漏水。

(3) 气缸体 气缸体的作用是支撑发动机所有的运动件和各种附件。气缸体内设置有冷却水道和润滑油道, 保证对高温状态下工作和高速运动的零件进行可靠的冷却和润滑。气缸体上部的圆柱形空腔称为气缸, 它引导活塞作往复运动, 气缸体下部的空间为上曲轴箱, 用来安装曲轴。

(4) 气缸套 气缸的耐磨性要求很高, 为了提高气缸内圆表面的耐磨性, 常在气缸体内镶入气缸套, 便于磨损后更换。

(5) 油底壳 油底壳是曲轴箱的下半部分, 用以储存发动机润滑油。油底壳中、后部较深, 当发动机纵向倾斜时, 机油泵能不间断地吸到润滑油。油底壳内部焊有挡板, 可以减少汽车行驶时润滑油的激烈振荡。油底壳底部有带磁性的放油螺塞, 可以吸附润滑油中的铁屑, 减少发动机磨损。

2. 活塞连杆组

它将活塞的往复运动转变为曲轴的旋转运动, 同时将作用于活塞上的力转变为曲轴对外输出的转矩, 以此来驱动汽车运动。该类机构由活塞、活塞环、活塞销和连杆等组成。

(1) 活塞 构成燃烧室的一个部分, 塞壁有圆孔, 可穿入活塞销, 连杆通过活塞销和活塞相连。其作用是将混合气燃烧所产生的爆炸力通过活塞销传给连杆, 来推动曲轴的曲柄, 使曲轴旋转。活塞的工作条件很苛刻, 顶部和高温燃气接触, 承受带冲击性的高压和因高速往复运动带来的惯性力, 整个活塞各部分受到拉、压、弯的综合力和力矩作用, 且受热也不均匀。因此要求活塞的质量小, 热膨胀量小, 传热性好, 耐磨。用铝合金制的活塞兼备以上性能, 因此铝合金是当前汽车活塞选用的材料。

(2) 活塞环 活塞环分气环和油环两种, 前者防止燃烧混合气窜入曲轴箱; 后者开有斜口, 富有弹性, 套在活塞上时, 有向外张紧贴在气缸筒壁的特性。如果密封状态被破坏, 出现漏气现象, 发动机就会丧失部分动力, 燃料和机油损耗增加, 活塞和燃烧室的表面出现严重积炭, 并造成环境污染。

(3) 活塞销 它是活塞与连杆小头的连接件, 其作用是将活塞受力传给连杆。由于在高温条件下要承受周期性的冲击力, 而且润滑条件又差, 所以要求它有足够的刚度、强度和耐磨性。活塞销一般用低碳钢制成, 表面渗碳, 再加以珩磨与抛光。活塞销装入活塞销孔和连杆小头孔内时是浮动的, 为了防止活塞销沿主轴方向窜动, 在活塞销孔内将卡环嵌在销座凹槽内予以限位。

(4) 连杆 它以上端的小头连接活塞销, 以下端的大头连接曲轴, 可将活塞的往复运动转变成曲轴的旋转运动。连杆一般采用中碳钢或合金钢材料经锻造、机械加工和热处理而制成。因为连杆工作时受到压缩、拉伸和弯曲周期性变化的力, 所以要求它质量尽可能小, 有足够的刚度和强度, 如果刚度不够会造成大头孔失

圆，轴瓦润滑不良而烧毁；杆身弯曲会造成气缸漏气、窜油等现象。

3. 曲轴飞轮组

它由曲轴和飞轮以及其他具有不同作用的零件和附件等组成。其中飞轮为一个转动惯量很大的圆盘，其作用是在做功过程中传给曲轴的一部分功储存起来，用以在其他行驶中克服阻力，带动曲轴连杆机构越过上、下止点，保证曲轴旋转角速度和输出转矩尽可能均匀，并使发动机有可能克服短时间的超载。通常应减小飞轮的质量，其大部分质量集中在轮缘，用灰铸铁制造。当轮缘的线速度超过 50m/s 时，应采用球墨铸铁或铸钢制造。

曲轴飞轮组主要由曲轴、飞轮、正时齿轮、带轮及曲轴扭转减振器等组成。

(1) 曲轴 要求曲轴耐冲击、耐磨，一般都用中碳钢或中碳合金钢锻造而成，也有采用球墨铸铁铸造的曲轴。

由于曲轴要在高速下旋转，所以需要不间断地用机油对摩擦表面加以润滑，因此在曲轴的主轴颈、连杆轴颈的曲轴本体内都钻有油道，以便机油能通过这些油道，润滑这些部位。

曲轴的作用是：在做功行程中，把活塞连杆组传来的气体压力（推力）转变为旋转的扭矩对外输出，经汽车传动系统驱动车辆行驶；利用曲轴和飞轮的旋转惯性，经连杆带动活塞上下运动，完成排气、进气、压缩等辅助行程，为下一次做功行程做准备。

(2) 飞轮 它主要有储存发动机动能的作用，在做功行程中储存能量，用以完成另外三个行程；将动力传给离合器，使发动机运转平稳；克服曲轴连杆组运动的阻力；克服短时间的过载，保证发动机输出的转矩和转速均匀。此外它还是摩擦式离合器的驱动件，因此它也需要和曲轴一起进行平衡。

飞轮安装在曲轴的后端，其材质为灰铸铁或球墨铸铁、铸钢，这是一个转起来惯性很大的圆盘，其边缘宽而厚。

2.1.2 零件的主要热处理方法与特点

曲柄连杆机构包括的零件较多，为确保其满足正常的服役需要，并具有一定的使用寿命，需要进行合理的选材与热处理，以满足其工作需要。从材料的选用到热处理方式，除了考虑材料化学成分外，还要考虑组织状态、冶金质量、加工工艺等，选择材料应遵循三条基本原则：满足零件的使用性能要求，具有较好的工艺性能，具有较好的经济性。

根据零件的服役条件与失效方式，结合选择的材料，应提出合理的热处理要求，即选用经济的热处理方法，获得要求的使用性能。根据零件的服役条件，零件热处理的主要工艺如下：

1) 退火处理包括完全退火、不完全退火、去应力退火、再结晶退火等，以满

足不同零件的加工或工作需要。

2) 正火处理包括高温正火、中温正火,其作用与目的是有差异的,要进行具体分析与判断,合理选择。

3) 淬火+回火处理中的回火包括低温回火、中温回火与高温回火(调质处理)等,钢铁材料分别获得了回火马氏体+碳化物、回火托氏体+碳化物、回火索氏体+碳化物,具有不同的组织与性能。

4) 化学热处理包括渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等,是用于改变零件表面性能的重要方法,零件可获得高的硬度、良好的耐磨性、耐蚀性等,可用来代替价格较高的高合金材料。

5) 表面淬火包括感应淬火、火焰淬火、电解液淬火、激光淬火等,达到零件表面硬化的目的,环境洁净、节能效果显著,是汽车零件热处理的发展方向。

6) 表面处理包括表面镀铬、镀锌、喷钼、磷化、发蓝处理等,可提高零件的耐磨性、耐蚀性等,延长零件的使用寿命。

2.2 活塞连杆机构的热处理

2.2.1 活塞

1. 工作条件和性能要求

活塞为曲柄连杆机构的主要部件,活塞的功能是与气缸盖、气缸壁共同组成燃烧室,承受气缸中气体的压力并通过活塞销和连杆传给曲轴。

活塞在工作过程中受力比较复杂:活塞交替地压向气缸壁,侧向压力作用于活塞裙部;活塞裙、活塞环槽和活塞销孔凸部都受到摩擦力的作用;混合气的燃烧使气缸内产生 2500K 以上的高温,通过活塞顶、活塞环带和活塞环将大量的热传给气缸壁。可见,活塞承受不同类型的应力与应变,故应具有低的密度、足够的强度与刚度、良好的耐热性、优异的传热性、摩擦力小以及良好的耐磨性、温度变化时尺寸及形状变化小等特性,满足其服役需要。引起活塞损坏的原因包括发动机装配和安装操作不当(如气缸盖螺栓拧紧不均匀引起的气缸变形、活塞销在连杆孔中装配过紧、气缸套不规则等)。常见的失效方式为活塞拉伤(无油运行拉伤)、活塞顶穿孔、烧蚀、变形与断裂等。

2. 活塞材料的选用

为满足活塞的以上技术要求,发动机广泛采用的活塞材料是铸造铝合金,常采用 ZL108、ZL109、ZL110、ZL201 等,它们具有较高的高温强度和低膨胀系数,适于制作发动机活塞、气缸头以及高温零件。有的柴油机也采用高级铸铁或耐热钢制造活塞。另外可采用铝硅合金(AlSi12CuNi)制造活塞,更高负荷则采用

AlSi18CuNi、AlSi25CuNi 制造活塞。铝合金活塞具有导热性好、质量轻、易于加工等特点，均是铸造加工的，应用比较广泛。

3. 活塞的热处理

(1) 活塞的技术要求 铸造铝合金经过热处理后，同一活塞中的硬度差应不大于 10HBW，其力学性能与体积稳定性见表 2-1。金相组织应符合 JB/T 6289—2005《内燃机 铸造铝活塞 金相检验》的规定。

表 2-1 活塞的力学性能与体积稳定性

材 料	抗拉强度/MPa		硬度 HBW	体积稳定性 (%)
	常温	300℃		
亚共晶铝硅合金	≥167	≥69	95 ~ 130	≤0.03D
共晶铝硅合金	≥196	≥69	95 ~ 140	≤0.03D
过共晶铝硅合金	≥196	≥69	95 ~ 140	≤0.02D

注：其中 D 为活塞的直径。

(2) 活塞的热处理工艺 活塞常用铸造铝合金的热处理工艺规范见表 2-2。

表 2-2 活塞常用铸造铝合金的热处理工艺规范

类别	合金 牌号	热处理 状态	热处理工艺（固溶 + 时效）	硬度 HBW	备 注
铝硅 合金	ZL108	T6	固溶：510 ~ 520℃ × 3 ~ 8h，水冷（60 ~ 80℃） 完全人工时效：165 ~ 175℃ × 14 ~ 18h， 空冷	100 ~ 140	用于制造高温下承受高负荷的柴油机活塞
	ZL109	T6	固溶：510 ~ 520℃ × 6 ~ 8h，水冷 完全人工时效：165 ~ 175℃ × 14 ~ 18h， 空冷	100 ~ 140	用于高温高速大马力活塞
	ZL110	T1	200 ~ 220℃ 10 ~ 16h，水冷	95 ~ 140	高温下工作的活塞
铝铜 合金	ZL201	T5	固溶：540 ~ 550℃ × 5 ~ 12h，水冷（60 ~ 100℃） 不完全人工时效：170 ~ 180℃ × 3 ~ 5h， 空冷	95 ~ 140	工作温度为 175 ~ 300℃ 的活塞

(3) 表面处理 表面处理包括镀铬、喷钼、镀锡以及渗氮等。

4. 活塞的热处理操作与质量检验

1) 活塞采用吊装或装夹具加热，铸件要均匀分层摆放，避免叠压，在加热温度下装炉，不要接触炉壁。

2) 固溶加热设备的控温精度不大于 ± 5℃，时效处理控温精度应不大于

$\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，否则会造成活塞硬度与体积稳定性不符合要求。

3) 固溶处理的转移时间应不超过 15 ~ 20s，活塞淬入水中要不停运动，在水中的冷却时间不少于 5min，并立即在油中或硝酸盐中进行时效处理。

4) 活塞的热处理质量检验包括硬度、抗拉强度等，在本体上取样进行性能检测。

5. 铝合金活塞的热处理缺陷分析与对策（表 2-3）

表 2-3 铝合金活塞的热处理缺陷分析与对策

缺陷类型	产生原因	预防措施
过烧	① 加热速度快，不平衡低熔点共晶体尚未扩散而发生熔化 ② 炉温仪表失灵 ③ 炉内温度分布不均匀	① 采用随炉以 200 ~ 250℃/h 的速度升温，或分段加热 ② 定期检查仪表，并安装超温报警装置 ③ 定期检查盐浴炉或空气炉的炉温分布
裂纹	① 铸件固溶处理前存在裂纹 ② 升温 and 冷却速度太大，附加过大的热应力导致开裂	① 改进铸造工艺 ② 缓慢加热
腐蚀	盐浴中氯离子含量高	定期检查，氯离子质量分数控制在 0.5% 以下

2.2.2 活塞环

1. 工作条件和性能要求

活塞环是汽车发动机中的重要零件，它对发动机的功率、油耗以及缸体寿命有较大的影响。活塞环包括气环和油环，气环用来密封气体，即用来封闭活塞与气缸之间的间隙，防止气缸漏气和高温下燃气滴入曲轴箱内，同时将活塞上的热量传给冷却的气缸，帮助活塞散热。油环安装在活塞的油环槽内，油环的作用是把缸壁上的机油刮布均匀和将多余的机油收集在槽内，并经槽底通孔流回油底壳，减少缸壁上的机油刮入燃烧室内造成燃烧室积炭，避免机油的消耗量增大。

要求活塞环具有足够高的弹性极限，良好的耐磨性及一定的抗擦伤性，一定的强度、韧性、抗疲劳性，良好的导热性和良好的抗燃气腐蚀性。其主要的失效形式为擦伤、磨损和疲劳折断。

2. 材料的选用

根据活塞环的功能与工作条件，制造活塞环的材料应具有良好的耐磨性、储油性、导热性、耐热性和高的冲击韧度，弹性与弹性模量大，具有足够的强度（包括抗折强度与疲劳强度）等。活塞环通常采用高强度优质灰铸铁、合金铸铁、可锻铸铁等制造，上压缩环用合金铸铁，其余高应力活塞环是由球墨铸铁或高合金钢

制造的。

球墨铸铁作为活塞环的材料,应用最为广泛。对于强力发动机,为保持其动能而采用高合金铸铁,如 Cu-V-Ti 合金铸铁、Cr-Mo 合金铸铁、高 P 铸铁、W-V-Ti 铸铁及球墨铸铁等。这些材料普遍具有高的耐磨性和耐蚀性,在活塞的反复运动过程中,始终能确保不漏油和气,同时也易于制作,具有小的摩擦因数。活塞环的形式如图 2-1 所示,第一道气环和第二道气环是防止燃烧气体泄漏的密封环,而油环的主要作用是控制润滑气缸内壁和活塞的润滑油的油量。

通常钢制活塞环选用的材料为 65Mn、50CrVA、T8A、20Cr13、95Cr18 等。钢制作的活塞环具有强度高、抗折断、成本低等优点,钢带组合油环的控油效果好。

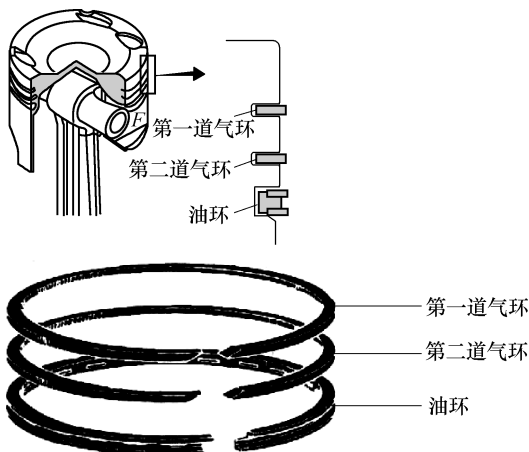


图 2-1 活塞环

目前国外已经开始采用铁基粉末冶金材料制造活塞环,它具有金属利用率高、材料性能好、内部空隙储油功能,具有良好的发展前景。

3. 活塞环的热处理

考虑到活塞环粗加工后加工应力较大,要进行去应力退火处理。铸铁的石墨形状为片状,具有良好的导热性、耐磨性和抗擦伤能力,加入合金元素后提高了热稳定性,细化了晶粒和提高了耐磨性,因此合金铸铁广泛应用于制作活塞环。

活塞环的热处理技术要求为硬度 98~108HRB,同一活塞环上硬度差不大于 3HRB;其组织为细片珠光体(或索氏体)+体积分数少于 20%的石墨(长度为 0.12~0.18mm)+体积分数少于 5%的铁素体(应分散分布)+磷共晶碳化物(应呈细小均匀分布)。

(1) 去应力退火 温度在 550~570℃范围内,保温 120min 结束后出炉空冷或炉冷至 480℃出炉空冷,可将加工应力消除 90%以上。后一种处理的活塞环的硬度均匀性好。通常铸铁环在粗磨两端面后退火,目的是消除铸造和机械加工应力、稳定尺寸和精度等。

(2) 活塞环的热定型(固定) 将缝隙大小固定,以使其压紧于气缸壁内,在工作过程中有适当的弹性。热定型是去应力退火的一种形式,活塞环的热定型采用专用夹具,上下为两个压盘,中间穿螺栓压紧,其中一个底盘固定。定型杆的宽度等于活塞环(胀圈)定型后的开口尺寸。压紧的程度以装好后用力抖动活塞环的

位置不变为宜。装夹后的活塞环可在可控气氛炉中加热，温度的选择以不破坏铸铁的组织为原则。定型处理后的硬度为 220 ~ 270HBW (98 ~ 105HRB)。具体铸铁活塞环热定型工艺规范如图 2-2 所示。

定型后的活塞环改善了组织，降低了基体的硬度，消除了应力，获得了一定的残留变形。为了保持弹性的稳定，活塞环还要在气缸中进行 400℃、保温 2 ~ 4h 的稳定化处理。

铸铁活塞环调质处理的目的是提高弹性模量与热稳定性，球墨铸铁活塞环调质处理的工艺规范如图 2-3 所示。

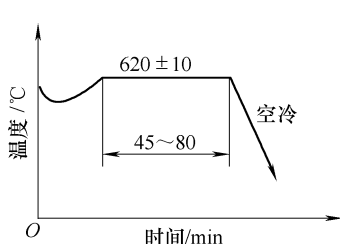


图 2-2 铸铁活塞环热定型工艺规范

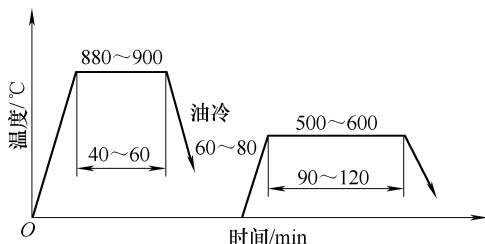


图 2-3 球墨铸铁活塞环调质处理的工艺规范

(3) 钢带活塞环的热处理 钢带活塞环的热处理工艺规范如图 2-4 所示。

(4) 活塞环的表面处理 其目的是为了提提高活塞环的表面硬度与耐磨性，改善表面的储油能力，以防粘着磨损，改善与气缸壁的磨合性能，提高其耐热性；加快活塞环的初期磨合，以改善活塞环与气缸的运动条件。

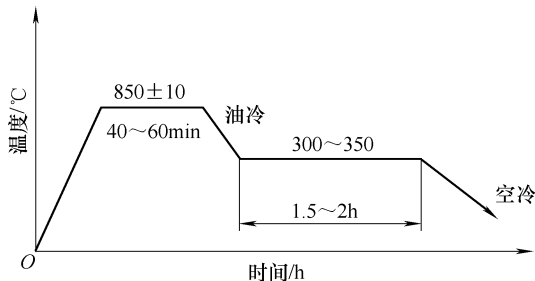


图 2-4 钢带活塞环的热处理工艺规范

1) 一般气环的工作条件差，外圆面上要进行多孔性镀铬，具有硬度高、可储存少量的润滑油、使用寿命提高 2 ~ 3 倍等特点。另外，也可喷涂钼或进行渗氮、激光热处理，端面进行磷化处理同样可起到良好的作用。

2) 油环镀锡或磷化处理，也可镀铬或喷涂钼，改善磨合性能和提高活塞环的耐磨性。压缩环镀铬层深度 $\geq 0.10\text{mm}$ ，油环镀铬层深度 $\geq 0.08\text{mm}$ 。镀铬后的活塞环要进行去氢处理，镀铬层硬度不低于 750HV (200HRB)。应对活塞环的未磨合部位进行防蚀处理，常见的方法为镀锡、渗氮等，渗层深度为 0.001 ~ 0.003mm。

表 2-4 列出了常见铸铁活塞环的性能对比。

表 2-4 常见铸铁活塞环的性能对比

铸 铁 名 称	抗拉强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	伸长率 (%)	冲击韧度/ (J/cm ²)	硬度 HRB	弹性模量 /GPa
灰铸铁	—	≥350	—	—	96 ~ 106	77 ~ 82
合 金 铸 铁 [w (Cr) = 0. 3%]	—	500 ~ 550	—	—	96 ~ 106	92 ~ 101
合金铸铁 [w (Cr) = 0. 2% 、 w (Mo) = 0. 2%]	—	500 ~ 530	—	—	100 ~ 105	85 ~ 90
合金铸铁 [w (w) = 0. 4% 、 w (Cr) = 0. 2% 和 w (Mo) = 0. 2%]	—	≥400	—	—	98 ~ 108	90 ~ 110
球墨铸铁	650 ~ 750	1300 ~ 1600	≥3	≥20	100 ~ 112	155 ~ 175

活塞环的表面处理在其制造过程中占有十分重要的地位，在生产中大量采用了上述处理工艺方法，提高了活塞环的耐磨性。对要求更高的耐热性和抗粘着活塞环，可进行喷涂钼处理，为便于比较几种表面处理工艺及性能，将其列于表 2-5 中供参考。

表 2-5 活塞环表面处理工艺及其性能特点

表面处理工艺	硬化层深度/mm	硬度 HV	耐 热 性		特 点
			熔点/℃	软化点/℃	
镀铬	0. 15 ~ 0. 20	≥750	1778	300	耐磨
喷涂钼	0. 15 ~ 0. 25	700 ~ 800	2640	500	耐热、耐粘着磨损
激光热处理	0. 15 ~ 0. 25	800 ~ 1000	1560	500	耐磨、没有剥落

活塞环镀铬后的硬度比热处理后的硬度约高 2. 5 倍，其耐磨性提高，电解析出的铬层与基体金属具有较高的结合强度，同时镀铬温度在 70℃ 以下，故不会破坏活塞环原来的金相组织，也不会使活塞环产生热应力变形，故其应用十分广泛。

活塞环除了采用镀铬与喷涂钼处理外，其他的表面处理还包括磷化处理与发蓝处理，少数采用渗硫或渗氮处理。磷化处理是以加快活塞环初期磨损、防止擦伤气缸为主要目的表面处理方法，在 90 ~ 98℃ 的温度下进行，蒸汽磷化法的磷化时间可缩短到普通的 1/10。

(5) 钢带活塞环的热处理与表面处理 常用的钢带活塞环材料为 50CrVA、65Mn、T8A 等，刮环用钢带的热处理是在管式可控气氛炉中进行的，淬火冷却介质为机械油。热处理后的钢带在绕圈机上缠绕后，与定型胎套一起放进热定型筒中密封，在电阻炉中进行定型处理。具体热处理工艺规范见表 2-6。

表 2-6 常用钢带活塞环材料的淬火和回火、定型热处理工艺规范

材 料	热处理工艺规范		热定型工艺规范		
	淬火温度/℃	回火温度/℃	定型温度/℃	保温时间/min	硬度 HRA
T8A	860 ± 10	380 ± 10	380 ± 10	120	74 ~ 78
65Mn、50CrVA	810 ± 10	390 ± 10	390 ± 10		

国外钢制活塞环通常选用 Cr13、Cr18 等高碳高铬马氏体不锈钢制作，在调质处理后进行氮碳共渗处理（560 ~ 580℃ × 2 ~ 3h），渗氮层深度在 0.05mm 以上，目的是提高活塞环的耐磨性与抗咬合性，进行表面强化处理，但需要采用活塞环专用渗氮工艺装备，防止缩口，以确保自由开口与尺寸稳定。

4. 活塞环的热处理工艺分析与操作要点

1) 活塞环的热定型包括铸铁热定型与钢带热定型两种，前者采用盐浴炉或电炉进行处理，后者则在电炉中完成。活塞环在心轴上的装配应压紧，垫片与插入的开口定型金属镶块应垂直无变形。加热完毕后空冷即可。

2) 应根据活塞环的磨损与润滑条件采用不同的表面处理方法。为提高活塞环的耐磨性，同时降低气缸的磨损，可选用镀铬工艺。为防止干摩擦，提高缸的抗拉能力，则选择喷钼和镶嵌金属氧化物填料的方法。为使环与气缸突出部位相接触而加剧磨损，缩短磨合期，使活塞环进入稳定的工作状态，应选择镀锡、发蓝和磷化处理等。

3) 活塞环作为有特殊要求的零件，在镀铬后应进行除氢热处理，目的是使大部分残留氢气排出，减小零件的脆性，提高其疲劳强度。采用的方法有水煮法（煮沸 6h）、油煮法（250℃ × 2h）和空气加热法（180 ~ 200℃ × 2 ~ 3h），其中油煮法效果最好，采用空气加热工艺较为普遍。

4) 钢带活塞环的热处理回火温度与定型温度是一致的，硬度不会降低，其回火托氏体组织又具有良好的弹性，起到稳定化的作用。质量检验包括以下内容。

① 硬度为 98 ~ 108HRB，同一活塞环上的硬度差不大于 3HRB。

② 金相组织为细片珠光体（或索氏体）+ 体积分数为 20% 的石墨 + 体积分数为 5% 的铁素体（应均匀分布）+ 磷共晶碳化物（细小均布）。

③ 外观检查包括：不允许有裂纹、毛刺、锈迹和崩缺等，镀铬后的活塞环表面无铬瘤、铬层裂纹、尖锐铬边和崩缺等，铬层与活塞环应牢牢结合，无脱落现象；活塞环外圆表面及上下端面无粗加工后的刀痕、振纹以及氧化皮等，退磁彻底，否则将造成活塞环的异常磨损。

2.2.3 活塞销

1. 工作条件和性能要求

活塞销是发动机上用于连接活塞和连杆小头的结构件，相当于双点支承架，为

钢制的空心圆柱体。其作用是连接活塞和连杆，将活塞承受的气体作用力传递给连杆。由于在较高的温度下工作，同时要承受非对称交变的载荷、一定的冲击力和摩擦力的作用，且表面处于润滑条件较差的摩擦条件下（一般靠飞溅润滑），因此要求它具有足够高的强度和刚度，韧性、表面耐磨性好，具有高的疲劳强度，质量尽可能小，同时要求配合表面有很高的表面质量和尺寸精度等。活塞销失效的主要形式为表面磨损和疲劳裂纹，活塞销的内孔形式如图 2-5 所示。

2. 材料的选择

根据活塞销的工作特点，活塞销在高温下承受极大的周期性冲击载荷，润滑条件差，故要求选用的材料有足够的强度、韧性、耐磨性及高的疲劳极限等，为减小往复惯性力，要求其质量轻。因此，制作活塞销的材料通常选用韧性较好的低碳钢或低合金结构钢（渗碳钢），常见的材料为 15、20、12CrNi3A、15Cr、18Cr2Ni4WA、20Cr、20Mn2、20CrMnTi、20CrMnMo 等低碳钢与低碳合金结构钢，也采用渗氮钢制造。为提高其在弯曲疲劳下的表面压力，外表面必须进行硬化处理，而内部具有高韧性，事实证明冷拔材料的耐久性较好。

3. 活塞销的热处理

(1) 技术要求 活塞销的外圆硬度为 58 ~ 64HRC，其余技术要求见表 2-7 和表 2-8。

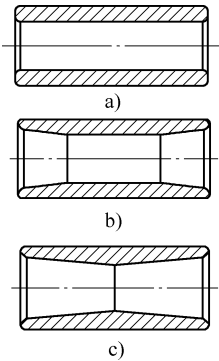


图 2-5 活塞销的内孔形式

- a) 圆柱形 b) 组合形
c) 两段截柱形

表 2-7 活塞销的心部硬度与壁厚的关系

材料牌 号	壁 厚		
	2 ~ 10mm	10 ~ 18mm	2 ~ 18mm
20	≤38HRC	—	—
15Cr、20Cr	24 ~ 45HRC	20 ~ 40HRC	—
20Mn2	—	—	24 ~ 48HRC

表 2-8 活塞销的渗碳技术要求（成品）

壁厚/mm		2 ~ 3	> 3 ~ 4	> 4 ~ 6	> 6 ~ 8	> 8 ~ 10	> 10
渗碳层深度/mm	外圆表面	≥0. 25	≥0. 30	≥0. 40	0. 5 ~ 1. 2	0. 6 ~ 1. 2	0. 8 ~ 1. 7
	内孔表面	≥0. 05		≥0. 10	≥0. 40		
渗碳层占总厚度的比例		≤40%	≤35%		≤33%		—

活塞销的渗碳层深度较深为 0.8 ~ 1.9mm 时, 渗层深度包括共析层深度、过共析层深度和 1/2 过渡层深度, 不允许有大块的碳化物。内孔表面脱碳或贫碳层不大于 0.03mm。

(2) 退火处理工艺 大多数的活塞销是经冷挤压或温挤压加工成形的, 因此热处理前首先进行预备热处理即退火与软化退火。常见活塞销 (冷挤压坯料) 的退火工艺规范见表 2-9。

表 2-9 常见活塞销 (冷挤压坯料) 的退火工艺规范

材料牌号	退火工艺参数	硬度 HBW
15Cr	在 740 ~ 760℃ 加热保温后, 炉冷至 550℃ 出炉空冷	≤137
20Cr、20CrMo	在 850 ~ 870℃ 甲醇作保护气氛的条件下加热, 炉冷至 600℃ 出炉坑冷, 防止其氧化和脱碳	≤140
20Cr	在 840 ~ 860℃ 的燃气、燃油炉或箱式炉中封箱退火, 300℃ 出炉空冷	≤140
20	在 870 ~ 890℃ 加热, 保温 0.5h 后直接出炉空冷	≤140

活塞经过挤压成形, 材料的晶粒被挤压后出现加工硬化, 故应进行软化退火或再结晶退火, 其规范为 680 ~ 720℃ × 12 ~ 14h, 炉冷至 300℃ 出炉后空冷。

(3) 活塞销的渗碳工艺 一般活塞销采用 20Cr、20CrMo 经冷挤压成形及进行双面渗碳处理, 20Cr 钢活塞销渗碳工艺规范见表 2-10。

表 2-10 20Cr 钢活塞销渗碳工艺规范

渗碳层 深度/mm	渗碳 温度/℃	试 样		滴注流量/(滴/min)			扩 散 时间/h	表面碳的质 量分数（%）
		时间/h	要求 深度/mm	强渗期	扩 散 期			
				煤油	煤油	甲醇		
1.3 ~ 1.9	950 ± 10	5	1.4	120	—	60 ~ 70	2.5 ~ 3	0.8 ~ 1.05
1.0 ~ 1.4	940 ± 10	3	1.1	180	50 ~ 60	20 ~ 30	2	0.8 ~ 1.05
0.8 ~ 1.1	940 ± 10	2.5	0.8	200	52 ~ 60	20 ~ 30	1.5	0.8 ~ 1.05
0.5 ~ 0.8	930 ± 10	2	0.8	280	—	—	—	0.7 ~ 1.0

注: 此表是在 RJJ-90-9 渗碳炉中渗碳时的具体数值。

为控制渗碳层碳化物级别, 要严格控制碳势。推荐采用双面渗碳, 双面渗碳后活塞销内孔表面得到强化, 产生了较大的残留压应力, 防止了内孔的纵向开裂, 同时可抵消部分外加拉应力的作用, 因此提高了疲劳强度, 延长了其使用寿命。20Cr 钢活塞销的渗碳处理工艺为 920 ~ 940℃ × 6 ~ 10h, 具体工艺如图 2-6 所示。

20 钢渗碳层的检验一般是在 850℃ 保温 20min 空冷后进行的; 15Cr、20Cr、20Mn2 等经过 850℃ × 15 ~ 20min + 650℃ × 10 ~ 20min 退火后在 100 倍显微镜下测量。

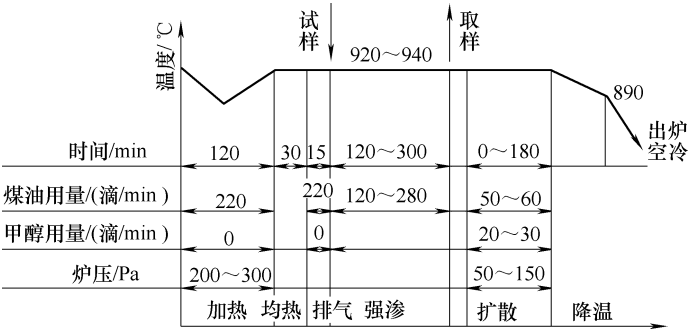


图 2-6 20Cr 钢活塞销的具体渗碳工艺规范

(4) 淬火和回火 活塞销渗碳结束后既可在 860℃ 左右冷却，也可缓冷到室温后重新在盐浴炉或保护气氛炉中加热处理，在 860 ~ 870℃ 保温后油冷。加热保温系数按 0.7 ~ 0.8δ（单位为 min/mm）计算，其中 δ 为活塞销的壁厚。淬火后的硬度不小于 58HRC，应无淬火软点或软带。在硝盐炉或油炉中进行 180 ~ 200℃ × 1.5 ~ 2h 回火处理，回火后硬度控制在 58 ~ 64HRC，同一活塞销中硬度差不大于 3HRC。如采用网带炉或振底炉，则工艺参数为 840 ~ 850℃ × 60min，采用循环油冷却，马氏体级别 1 ~ 5 时为合格，碳化物为 1 ~ 3 级时合格。

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 15Cr 钢活塞销 930℃ 渗碳空冷后，采用 850℃ × 2h 油冷热处理，要求低温回火后硬度为 57 ~ 65HRC，抗拉强度为 800 ~ 1250MPa，但油冷后个别活塞销存在软点，硬度为 50 ~ 55HRC，抗拉强度明显低于要求。15Cr 钢活塞销 930℃ 渗碳后经不同热处理后的各项技术指标的对比见表 2-11。

表 2-11 15Cr 钢活塞销 930℃ 渗碳后经不同热处理后的各项技术指标的对比

序号	热处理工艺	表面硬度 HRC	抗拉强度 R_m /MPa	冲击初度 α_k /(J/cm ²)	表面组织	心部组织
1	850℃ × 3h 油冷 + 170℃ × 3h 空冷	53 ~ 63	770	—	—	M + F
2	890℃ × 3h 油冷 + 170℃ × 3h 空冷	55 ~ 64	790	—	—	M + 少量 F
3	850℃ × 3h 淬三硝水 + 170℃ × 3h 空冷	63 ~ 64	1030	83	M + K	M
4	890℃ × 3h 淬三硝水 + 170℃ × 3h 空冷	63 ~ 64	1020	58	M + K + A'	粗大 M

从表 2-11 中可知, 活塞销油冷后出现软点, 心部有铁素体组织, 将影响其使用性能。采用三硝水作为淬火冷却介质, 则心部形成马氏体组织, 抗拉强度在 800 ~ 1250MPa 范围内, 完全符合技术要求。

2) 15Cr、20Cr 钢活塞销渗碳后大多采用二次淬火工艺, 其缺点在于渗碳层的碳质量分数为 1.0% ~ 1.3%, 超过了共析成分, 在淬火时得到了较多的碳化物, 同时残留奥氏体增加, 个别位置的硬度降低, 因此在活塞销的摩擦部位会有麻点产生, 造成其耐磨性的下降。经反复实践证明, 通过调整活塞销的渗碳气氛, 控制碳质量分数在 0.8% 左右, 淬火后得到马氏体 + 均匀分布的颗粒状碳化物, 因此可在渗碳后进行一次淬火工艺, 20Cr 钢活塞销渗碳新工艺如图 2-7 所示。

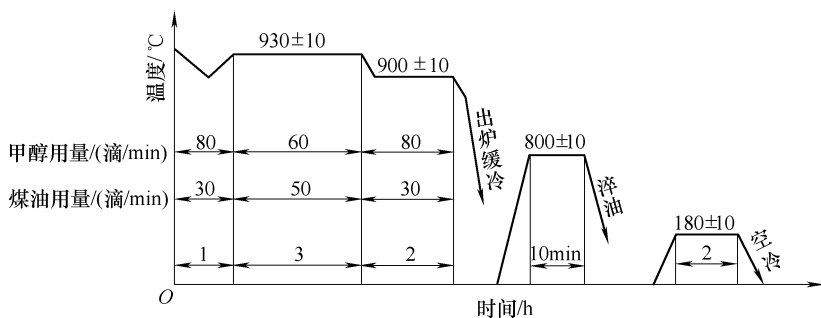


图 2-7 20Cr 钢活塞销渗碳新工艺

3) 活塞销除了采用一般的热处理工艺进行淬火和回火外, 对其进行高频感应淬火更有意义。高频感应淬火后的显微组织分级是控制产品质量的一个重要指标, 活塞销同样也不例外。通常活塞销的显微级别为 3 ~ 6 级, 同时 3 ~ 6 级也是高频感应淬火的常见金相组织级别, 能满足零件的技术要求和确保零件使用寿命的提高。

感应加热速度快, 组织变化比较大, 因此显微组织能够及时反映感应淬火后是否过热或欠热、加热不足等, 从上面的讲述中可以了解到: 3 级为中等针状马氏体; 4 ~ 5 级为细针状马氏体; 6 级为细针状马氏体, 是最理想的组织。

4) 质量检查检验包括以下几个方面: 渗碳层深度符合要求; 活塞销的内孔硬度合格, 同一销的工作面硬度差不大于 3HRC; 金相组织为细针状马氏体, 允许存在少许粒状碳化物; 表面不允许有任何形式的裂纹和锈迹, 无尖角、毛刺和氧化物, 应进行磁粉无损检测; 外圆不得有麻点、黑斑、刻痕以及磕碰伤。

5. 活塞销的常见热处理缺陷和预防挽救措施

在活塞销渗碳和热处理过程中, 有一些因素直接影响产品质量。常见的活塞销热处理缺陷和预防补救措施见表 2-12。另外, 材料本身的原因也会造成活塞销的淬火开裂, 如材料的化学成分、材料的质量状态及原始应力状态等, 而成分主要取

决于零件的工作状况和服役条件，高的硬度要选择含碳量高的材料；对于大转矩、大弯矩作用下工作的零件，要求材料具有高的抗扭强度或抗弯强度和高的弯曲疲劳强度等。

表 2-12 常见的活塞销热处理缺陷和预防补救措施

缺陷类型	产生原因分析	预防和补救措施
渗碳层硬度不合格	① 渗碳温度控制不当 ② 渗碳时间短	① 严格执行工艺温度和时间 ② 可再进行一次补渗
渗碳层硬度不均匀	① 零件表面太脏、有积灰 ② 装炉量大，零件冷却效果差 ③ 渗碳时气体流通效果欠佳	① 表面应清理干净 ② 合理装炉 ③ 确保炉内气体循环畅通
表面脱碳	① 渗碳后空冷速度太慢 ② 用于加热的盐浴炉未脱氧 ③ 加热炉内气氛的碳势低	① 零件要散开空冷 ② 盐浴炉及时脱氧 ③ 在保护性气氛中加热
渗碳层碳浓度低	① 炉内的碳含量低 ② 炉内气氛循环不良 ③ 装炉量过大	① 严格控制炉内碳势 ② 改进炉内气体的循环 ③ 减少装炉量 ④ 重新进行渗碳处理
碳浓度过高、表面出现粗块状或连续网状碳化物，淬火后残留奥氏体含量高	① 炉内碳势过高 ② 强渗后扩散的时间短 ③ 扩散温度低	① 严格控制碳势 ② 改进扩散工艺，在 900 ~ 920℃ 进行扩散处理 ③ 860 ~ 880℃ 长时间加热淬火消除网状碳化物 ④ 进行冰冷处理或二次淬火消除过量的残留奥氏体
淬火开裂	① 化学成分、材料的质量状态及原始应力状态不合格 ② 淬火温度过高，出现过热 ③ 淬火冷却介质过于激烈	① 采用符合要求的材料 ② 严格执行热处理加热温度工艺要求，杜绝超温 ③ 选用冷却能力合适的淬火冷却介质

2.2.4 活塞杆

1. 工作条件和技术要求

活塞杆同活塞一起在腐蚀的环境下工作，负责动力的传递，在工作过程中受到往复拉、压交变应力的周期作用，活塞环与填料之间发生滑动摩擦，因此要求活塞杆具有足够的强度和高的表面硬度，以及具有抗腐蚀、抗疲劳、抗擦伤和抗咬合

能力。

从活塞杆在工作过程中的受力状况而言,选用的材料应为调质钢,热处理后表面硬度高,而内部有良好的综合力学性能。为提高活塞杆的使用寿命,其表面应进行强化处理,以满足其表面耐磨、耐蚀、摩擦因数小的技术要求。

2. 材料的选用

38CrMoAlA 是活塞杆的首选材料。

3. 活塞杆的热处理工艺

热处理技术要求:调质处理硬度为 28~35HRC,渗氮层深度大于 0.35mm,表面硬度为 1100HV5 以上,脆性 2 级,无网状与脉状组织。

(1) 材料的预备热处理 38CrMoAlA 钢的预备热处理包括正火和调质,其正火工艺为 $770^{\circ}\text{C} \times 60\text{min} + 940^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$,保温结束后取出空冷。

调质工艺为 $880 \sim 900^{\circ}\text{C} \times 30\text{min} + 930 \sim 950^{\circ}\text{C} \times 25 \sim 30\text{min}$,预冷至 880°C 左右淬油,在 $610 \sim 630^{\circ}\text{C} \times 120 \sim 180\text{min}$ 高温回火后空冷,基体硬度为 28~35HRC。

活塞杆经真空热处理可以发挥材料的潜力,避免零件表面的氧化和脱碳,具有表面光亮和变形小等特点,表面的状态没有受到影响,因此明显提高了疲劳强度。

(2) 材料的最终热处理——离子渗氮 采用离子渗氮是为了提高活塞杆的表面硬度、获得良好的耐磨性和耐蚀性,可明显提高其使用寿命。

在活塞杆的实际生产过程中通常选用三段离子渗氮工艺,即 $510 \sim 530^{\circ}\text{C} \times 4\text{h} + 560 \sim 580^{\circ}\text{C} \times 8\text{h} + 510 \sim 530^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$,渗氮结束后随炉降温至 100°C 以下出炉空冷。渗层深度为 0.37~0.39mm,硬度为 1096~1150HV5,脆性小于 2 级,渗氮层无网状、脉状渗氮物,组织正常。

目前用中频感应淬火来代替活塞杆的离子渗氮,实际使用效果不错。首先进行调质处理后再进行中频感应淬火,可使表面硬度控制在 52~60HRC 之间,变形量小于 0.5mm。

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 正火时活塞杆均匀散开,防止冷却不均匀而影响后面工序的调质处理质量,同时也会产生较大的变形。

2) 离子渗氮前的去应力退火温度为 $580 \sim 600^{\circ}\text{C}$,保温 8~10h。目的是消除校直和机械加工产生的应力或锤击力,避免后面工序中出现变形等缺陷影响加工质量,不能进行人工校直。

3) 进行离子渗氮时应对螺纹部分进行保护处理,可套上螺母或铜环等加以屏蔽。

4) 质量检验包括基体硬度、组织、表面硬度与渗氮层深度、变形量等,按要求进行检查。

5. 活塞杆的常见热处理缺陷与对策（表 2-13）

表 2-13 活塞杆的常见热处理缺陷与对策

缺陷类别	产生原因	预防措施
基体硬度不合格	① 淬火温度低 ② 回火温度高或保温时间长	① 定期校温，检查硬度 ② 设定温度与保温时间，并检查
变形	① 淬火时摆动大 ② 未吊挂加热 ③ 回火时摆放不合理	① 规范操作 ② 采用专用的挂具加热 ③ 垂直回火或垫砂回火，减少变形或弯曲
渗氮层深度浅、表面硬度低	渗氮温度低或时间短	严格执行工艺参数，进行试样检查

2.2.5 连杆

1. 工作条件和技术要求

汽车发动机连杆（图 2-8）将活塞和曲轴连接起来，小头与活塞一起作往复运动，把作用于活塞顶部端面的膨胀气体压力传递给曲轴，将活塞的往复直线运动变为曲轴的旋转运动，连杆在工作过程中将活塞受到的气体压力传递给曲轴，再由曲轴转变成输出的转矩。连杆的大头和曲轴一起作旋转运动，而杆身作十分复杂的平面摆动等，因此连杆在工作过程中会受到交变的拉应力和弯应力作用，同时承受急剧变化的动载荷的冲击，其受力方式十分复杂，整个截面都要承受均匀的拉应力、压应力以及脉动交变应力的作用。因此要求其所用材料具有良好的综合力学性能。

综上所述，连杆在工作过程中受到压缩、拉伸、弯曲和冲击交变载荷作用。因此，和活塞一样，要求连杆质量轻，具有足够的刚度和强度、高的疲劳强度和冲击韧度等，否则连杆螺栓、杆身的大端盖将发生断裂，造成发动机的损坏。作为发动机容易损坏的零件，其损坏形式为断裂，疲劳断裂发生在连杆的三个高应力作用区，即大头与杆身和小头与杆身的过渡区（在螺栓孔附近）以及杆身中间。断裂与原材料缺陷、锻造折叠及淬火裂纹等造成的失效有关。

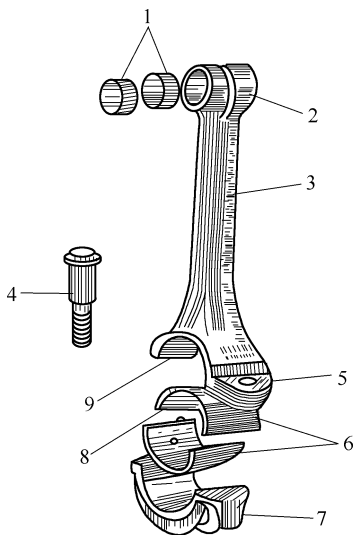


图 2-8 汽车发动机连杆

- 1—衬套 2—小头 3—杆身
4—螺栓 5—大头 6—轴瓦
7—轴承盖 8、9—止口

2. 材料的选用

根据连杆的工作条件和技术要求, 连杆调质处理后的显微组织应为均匀、细小的索氏体, 为确保连杆既具有足够的强度, 又获得较高的韧性以及优良的抗疲劳性能, 不得有片状铁素体和非金属夹杂物。最后需进行强化喷丸处理。对于非调质钢可采用铁素体-珠光体钢制造汽车曲轴和连杆工艺, 如 35VS、35MnV、35MnVS、40MnV 以及 43MnS 等。目前国外汽车公司在赛车上使用钛合金连杆, 具有强度更高和质量更轻的特点, 减轻了质量且提高了使用寿命。

根据连杆的工作环境的具体要求, 连杆通常采用中碳钢或合金钢模锻或辊锻而成, 常见的材料有 40、45、50、45Mn2、40Cr、35CrMo、42CrMo 等, 也有少数采用稀土-镁球墨铸铁制造的连杆。

3. 连杆的热处理

目前连杆的生产厂家利用锻造余热进行淬火和回火, 以此来取代调质工艺, 但应注意回火后的连杆在热校直后, 仍要进行低温回火处理。

连杆的热处理技术要求为: 花键与杆部硬度为 37 ~ 44HRC, 盘外圆硬度为 24 ~ 34HRC。常见连杆常用材料的预备热处理技术要求见表 2-14。

表 2-14 连杆常用材料的预备热处理技术要求

材 料	热处理工艺	硬度 HBW
45	调质处理	217 ~ 293
40Cr		217 ~ 293
35CrMo		217 ~ 320
40MnB	调质	229 ~ 269
55	锻造余热正火、回火	229 ~ 269
18Cr2Ni4W	调质	321 ~ 363

(1) 调质处理 连杆经调质处理后可获得良好的力学性能, 降低了硬度, 改善了切削加工性, 细化了晶粒, 为最终热处理做好了组织准备。表 2-15 为常见碳素钢、合金结构钢连杆调质处理工艺规范。

表 2-15 常见碳素钢、合金结构钢连杆调质处理工艺规范

车辆类型	材 料	淬 火 规 范		回 火 规 范			硬度 HBW
		加热 温度/℃	冷 却 介 质	加热 温度/℃	保温 时间/min	冷 却 介 质	
轿车、 吉普车	40Cr	860 ± 10	油	620 ± 10	60	水	241 ~ 298
	45	840 ± 10	盐水冷却 15s 转油冷	670 ± 10	30	空气	207 ~ 241
	45Mn2	850 ± 10	油	630 ± 10	150	喷水	228 ~ 269

(续)

车辆类型	材 料	淬 火 规 范		回 火 规 范			硬度 HBW
		加热 温度/℃	冷 却 介 质	加热 温度/℃	保温 时间/min	冷 却 介 质	
载货汽车	45	终锻温 度≥950	盐水冷却 5s 后空冷	610 ± 10	120	空气	217 ~ 329
	45	820 ± 10		590 ± 10	120		228 ~ 269
	40MnB	850 ± 10		650 ± 10	120		
	55	终锻温 度≥900		650 ± 10	150		
重型载 货汽车	40Cr	850 ± 10	油	610 ± 10	210	水	223 ~ 280
	42CrMoA	860 ± 10		550 ± 10	180	空气	
	40SiMn	860 ± 10		560 ± 10	150		
大功率 柴油机 汽车	42CrMo	870 ± 10		620 ± 10	240		298 ~ 321
		860 ± 10		570 ± 10	180		311 ~ 331

(2) 利用锻造余热进行连杆的淬火和回火 该工艺具有可简化程序、节省能源、改善切削加工性、提高力学性能的优点。资料介绍, 40Cr 和 45 钢连杆分别利用余热淬火和回火, 与调质处理的力学性能相比, 抗拉强度、断面收缩率、冲击韧度和硬度均有提高, 二者的工艺和力学性能比较见表 2-16。一般碳的质量分数为 0.40% ~ 0.55% 的中碳钢锻件均可采用余热淬火。

表 2-16 40Cr 和 45 钢连杆锻造余热淬火工艺与一般调质处理的工艺和力学性能比较

材料	热处理工艺	力 学 性 能				
		R_m /MPa	Z (%)	A (%)	a_K (纵向/横向) /(J/cm ²)	硬度 HBW
40Cr	1160℃ 锻后余热 淬火, 600℃ 回火	856	66.1	19.5	166/94	252 ~ 260
	850℃ 淬火, 610℃ 回火	799	65.6	20.6	163/59	249 ~ 255
45	1180℃ 锻后余热 淬火, 600℃ 回火	914	58.2	19.3	123 (纵向)	246
	850℃ 淬火, 550℃ 回火	877	57.3	18.2	121 (纵向)	235

(3) 连杆的喷丸强化处理 连杆经调质处理后, 硬度为 228 ~ 269HBW, 连杆经过喷丸处理后, 表层会产生一定的塑性变形, 这将使晶体的点阵发生畸变, 表层形成高密度的位错缠结, 从而使表层得到了强化。采用喷丸强化处理后, 连杆表面的残留压应力增大, 表面硬度得到了明显提高, 如 45 钢的压应力增大到 -350MPa 时, 其疲劳寿命从 48 万次提高到 190 万次以上, 即使用寿命约提高到原来的 4 倍。可见对连杆进行喷丸强化后, 明显提高了疲劳强度、使用寿命、抗弯强度等。表 2-17 为常见连杆材料喷丸强化工艺参数。另外对连杆进行滚压加工也不失为一种良好的强化工艺措施, 既可消除切削加工的痕迹, 又可使槽的几何尺寸和形状精确, 提高了连杆的疲劳寿命。

表 2-17 常见连杆材料喷丸强化工艺参数

材 料	钢丸直径 /mm	喷丸速度 /(m/s)	钢丸流量 /(kg/min)	喷丸弧高/mm	喷丸时间/min	表面覆 盖率 (%)
45	1.0 ~ 1.2	60 ~ 70	140 ~ 160	0.18C	1.5	≥98
18Cr2Ni4W	0.8 ~ 1.2	70 ~ 80	—	—	4	—
18Cr2Ni4W	1.0 ~ 1.2	75 ~ 80	300	0.38 ~ 0.44C	3 ~ 4	—
42CrMoA	0.8 ~ 1.0	70 ~ 80	200	0.46 ~ 0.76C	1 ~ 1.2	≥98

注: 0.18C 表示 C 型标准试样的测量弧高为 0.18mm。

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 连杆的锻造加热温度控制在 1100 ~ 1220℃ 为宜, 终锻温度 (淬火温度) 为 900 ~ 1000℃, 锻造后油冷应控制入油的停留时间, 以防析出铁素体。

2) 要控制淬火油温和在油中的冷却时间, 连杆要及时回火, 否则会引起裂纹的产生。

3) 目前, 对连杆进行中频感应加热是一种经济有效的毛坯热处理方法, 处理后的各项技术指标符合连杆的要求。

4) 40、40Cr、40MnB 钢连杆的热处理质量检验项目见表 2-18。

表 2-18 40、40Cr、40MnB 钢连杆的热处理质量检验项目

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求
表面质量	采用荧光无损检测方法, 缺陷部位的荧光磁粉在紫外线灯下激发出黄绿色	连杆表面应无裂纹、发纹、折叠、氧化坑、错移、金属未充满、分层和夹渣等缺陷, 不加工的表面要求清洁, 毛坯经喷丸或其他表面处理
纤维方向	显示宏观组织	连杆体和连杆盖纵面金属宏观组织中的纤维组织应沿着连杆中心线分布并与外形相符, 不得有紊乱和间断

(续)

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求
硬度	按图样位置检验：硬度的检查部位在大头和小头的加工处，100% 检验	按产品图样要求检验，硬度值应符合图样技术要求
显微组织	按标准检验与评级	均匀一致的细索氏体
无损检测	100% 磁粉无损检测	有裂纹者报废

5. 连杆的常见热处理缺陷和补救措施（表 2-19）

表 2-19 连杆的常见热处理缺陷和补救措施

缺 陷 名 称	产 生 原 因	预防和补救措施
表面脱碳	① 高温下锻造时间过长 ② 加热时操作不当	① 严格执行工艺要求，控制加热时间 ② 采用保护气氛加热
硬度低	① 加热温度低 ② 冷却速度慢	重新进行热处理
组织不均匀	① 操作方法不当 ② 冷却速度快 ③ 原材料有组织偏析	① 严格执行热处理工艺 ② 选用合适的淬火冷却介质 ③ 消除原材料的偏析，确保组织的均匀
淬火裂纹	① 冷却速度快 ② 材料成分不合格	① 选用合适的淬火冷却介质 ② 选用合格的材料

2.3 曲轴飞轮机构的热处理

2.3.1 曲轴

1. 工作条件和性能要求

曲轴（图 2-9）是内燃机最重要的零件之一，它与气缸、活塞和连杆等零件组成了发动机的动力装置。

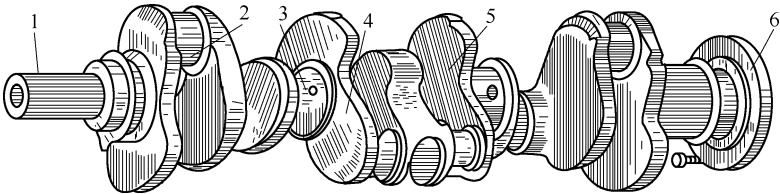


图 2-9 曲轴的构造

1—曲轴前端 2—连杆轴颈 3—主轴颈 4—曲柄臂 5—平衡重 6—飞轮接盘

曲轴的作用是将做功行程中经连杆传来的力变成转矩，并带动发动机其他机件（如水泵、油泵和气门等）运动和向外输出动力（功率）。曲轴的转速为 6000r/min，发动机的每个工作行程都有很大的燃气压力，通过活塞、连杆突然传递到曲轴上，并以 100 ~ 200 次/s 的频率反复冲击曲轴，因此将造成曲轴的扭转振动和弯曲振动，同时在一一定的条件下还会产生很大的附加应力，因此受力十分复杂。此外在高速内燃机中还存在扭转振动，这会造成很大的应力。曲轴的主轴径、连杆轴径和曲轴臂各处受到较严重的磨损，受力各不相同。

具体而言，曲轴应具有以下力学性能：具有足够的强度，减少轴径的翘曲变形，提高自抗振能力；表面有高的硬度、弯曲疲劳强度、抗扭强度和耐磨性，轴颈处有高耐磨性；有高的疲劳强度和冲击韧度；有良好的润滑作用。

2. 材料的选用

曲轴常用中碳钢和中碳合金钢模锻而成，也可采用球墨铸铁制造。一般根据发动机的负荷、种类不同而选用不同的钢种，汽油机采用碳素钢，而柴油机多采用低或中碳合金钢制造。钢分为碳素结构钢（如 45、50 等）、中碳合金结构钢（如 40Cr、40MnB、50Mn、35CrMo、42CrMo、40CrNiMoA、18Cr2Ni4WA 等）、非调质钢（如 45V、48MnV、49MnVS3 等）。球墨铸铁分为镁球墨铸铁、稀土球墨铸铁和合金球墨铸铁等。为提高曲轴的耐磨性和疲劳强度，曲轴轴颈表面需进行高频感应淬火或渗氮处理，并进行磨削加工，以获得低的表面粗糙度值和高的表面精度。

通常材料的选择依据为：低速内燃机采用正火状态的碳素钢、球墨铸铁；中速内燃机采用调质碳素钢或合金钢，如 45、40Cr、45Mn2、50Mn2 等及球墨铸铁；高速内燃机则采用高强度合金钢，如 35CrMo、42CrMo、18Cr2Ni4WA 等。

曲轴的常用材料及相关技术要求见表 2-20。在实际生产过程中常采用 45 钢和球墨铸铁制造曲轴。部分内燃机曲轴用铸铁及其力学性能要求见表 2-21，供参考。

表 2-20 曲轴的常用材料及相关技术要求

材 料 牌 号	预备热处理	最终热处理	曲轴的适用范围
45、50、45Mn、45Mn2 50Mn、40Cr、40MnB	调质或正火	感应淬火（或火焰淬火）	中型载货汽车、轿车和中型拖拉机曲轴
40CrNiMoA、40CrNi、 35CrMo、42CrMo	调质	感应淬火或调质	重型载货汽车曲轴
合金球墨铸铁	正火	正火或感应淬火	中型载货汽车、轿车和中型拖拉机曲轴
镁球墨铸铁 稀土-镁球墨铸铁			

表 2-21 部分内燃机曲轴用铸铁及其力学性能要求

材 料 牌 号	热处理工艺及性能要求
QT900-2 QT800-2	正火硬度为 240 ~ 300HBW，气体氮碳共渗，渗层深度 ≥ 0.20mm，表面硬度 ≥ 500HV0.1，轴颈圆角滚压强化
QT800-2	正火硬度为 229 ~ 302HBW，盐浴氮碳共渗，渗层深度 ≥ 0.15mm，表面硬度 ≥ 500HV0.1
QT800-2	正火硬度为 240 ~ 280HBW，各轴颈感应淬火，或整体氮碳共渗，渗层深度为 0.1 ~ 0.3mm，表面硬度 ≥ 500HV0.1
QT700-2	正火硬度为 229 ~ 302HBW

曲轴采用锻压或冲压成形，曲轴的整体流线随轴向而变化，可确保具有最佳的力学性能。成形后经正火、调质处理，切削加工后进行的热处理通常是在轴径部位进行感应淬火。整体锻压曲轴的方式有自由锻、模锻等，其中模锻曲轴具有强度高，有利于纤维方向和组织的合理分布，有利于获得最佳的截面模量和结构紧密的细晶粒金相组织，尺寸紧凑，质量较轻等特点，因此在实际生产过程中应用较广。

3. 曲轴的热处理工艺

(1) 曲轴的热处理技术要求

1) 在所有主轴径和连杆轴径处锻钢淬硬层硬度均为 55 ~ 63HRC，淬硬层深度为 2.0 ~ 4.5mm，晶粒度为 3 ~ 7 级，淬硬层边缘到曲轴端面的非淬硬带长度，对于 V 形曲轴不大于 4 ~ 5mm，对于直列式曲轴不大于 6 ~ 8mm。

2) 球墨铸铁淬硬层硬度为 42 ~ 55HRC，淬硬层深度为 1.5 ~ 4.5mm。

3) 曲轴毛坯热处理前的硬度：锻钢正火后为 163 ~ 241HBW，调质后为 207 ~ 302HBW；球墨铸铁正火后为 240 ~ 300HBW。

(2) 曲轴的预备热处理 可获得必要的力学性能，改善材料的切削加工性，为最终热处理做组织准备。对锻钢而言，调质处理后为回火索氏体组织，硬度为 207 ~ 302HBW；正火后组织为珠光体 + 铁素体，硬度为 163 ~ 241HBW，晶粒度为 10 ~ 14 级；对球墨铸铁来说，正火硬度为 240 ~ 300HBW，石墨球等级为 1 ~ 3 级，晶粒度为 5 ~ 8 级。

(3) 曲轴的热处理

1) 45 钢曲轴的热处理。根据曲轴的技术要求，材料表面应硬度高，耐磨性好，而心部应具有高的强度和冲击韧度。因此曲轴的热处理可采用一般淬火、火焰淬火和高频感应淬火三种方法。

① 一般整体加热淬火和冷却。在箱式炉或在盐浴炉中快速加热，在淬火机床中加压冷却，通过调整加热温度、加热速度、冷却时间和淬火冷却介质，可获得不同的淬火组织。表面组织为马氏体而心部组织为索氏体，达到外硬内韧的技术要求。

② 火焰淬火和冷却。用氧-乙炔火焰加热后水冷，喷嘴不动，曲轴的转动速度为 8m/min，应控制加热的速度和温度，淬火后的淬硬层为 3 ~ 5mm。

③ 高频感应淬火和冷却。采用曲轴轴径轮流淬火的方法，分别进行表面淬火，曲轴的淬火温度为 860 ~ 900℃，感应器（圈）内壁圆周上钻有供应冷却水的小孔，其直径为 1.5 ~ 2.5mm，水的压力通常为 0.15 ~ 0.35MPa。硬度和淬硬层符合要求。感应淬火是一种节能的热处理技术，可明显提高热处理的工作效率，按生产节拍组织生产，因此可称为热处理成本最低的热处理技术。各种表面处理对曲轴弯曲疲劳强度的影响如图 2-10 所示。

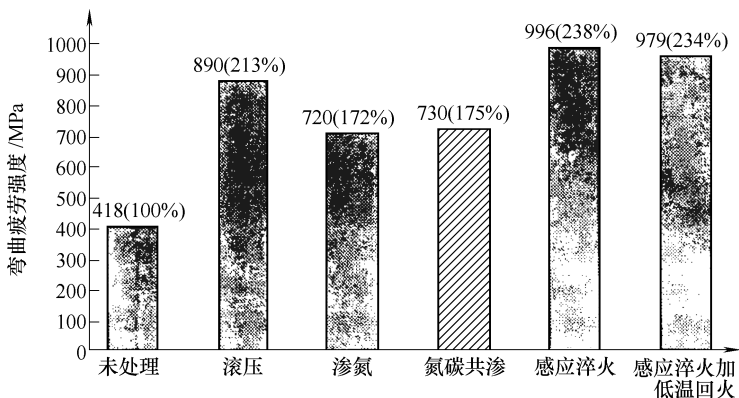


图 2-10 各种表面处理对曲轴弯曲疲劳强度的影响

2) 球墨铸铁曲轴的热处理。其热处理工艺有正火和感应淬火两种。球墨铸铁主要进行奥氏体正火处理，为提高曲轴的力学性能，也可采用调质或正火后表面淬火、等温淬火等工艺，以提高球墨铸铁曲轴的韧性和塑性。球墨铸铁的传统正火工艺见表 2-22。

表 2-22 球墨铸铁的传统正火工艺

热处理类别	热处理工艺	金相组织	性能
完全奥氏体化 高温正火工艺	900 ~ 920℃ × 2 ~ 3h 加热， 出炉风冷到 300℃ 以下，500 ~ 550℃ × 3h 回火	5%（体积分数）铁素体 + 少量的游离碳化物	较高的强度和较低的韧性
奥氏体化正火工艺	820 ~ 860℃ × 2 ~ 3h，出炉快速风冷到 300℃，500 ~ 550℃ × 3h 回火	10%（体积分数）铁素体 + 珠光体 + 少量的碳化物和珠光体共晶	较高的强度和较低的韧性
高、中温两段正火	900 ~ 920℃ × 3h + 840 ~ 860℃ × 2.5h 加热，出炉快速风冷到 300℃ 以下，500 ~ 550℃ × 3h 回火	5% ~ 10%（体积分数）铁素体 + 珠光体 + 少量的碳化物和珠光体共晶	强度和韧性较高

高频感应淬火温度为 900 ~ 950℃，加热速度要低（75 ~ 150℃/s）。在 300℃ 自回火，回火温度为 180 ~ 220℃，时间为 1.5 ~ 2h，硬度为 52 ~ 57HRC。

3) 曲轴的表面热处理（表面强化）。曲轴经过氮碳共渗处理后，其疲劳强度和轴径的耐磨性得到大幅度提高，硬度≥420HV，渗层深度不小于 0.10mm。而离子渗氮的硬度和渗层深度优于氮碳共渗处理工艺。

(4) 常见曲轴的热处理工艺规范 常见曲轴用材料的预备热处理和最终热处理工艺规范见表 2-23。

表 2-23 常见曲轴用材料的预备热处理和最终热处理工艺规范

汽车类型	材 料	预备热处理		最终热处理工艺规范		
		工 艺	硬 度 HBW	具 体 工 艺	层深/mm	硬 度
轿车、 轻型载 货汽车	45	正火	170 ~ 228	感应淬火、回火	2 ~ 4.5	55 ~ 63HRC
	50Mn	调质	217 ~ 277	氮碳共渗 570℃ × 180min	> 0.5	≥500HV0.1
	QT600-3	正火	229 ~ 300	氮碳共渗 560℃ × 180min	≥0.10	> 650HV
载货汽车	QT600-3	正火	220 ~ 260	感应淬火、回火	2.9 ~ 3.5	46 ~ 58HRC
	45	正火	163 ~ 196	感应淬火、回火	3 ~ 4.5	55 ~ 63HRC
	45	调质	207 ~ 241	感应淬火、回火	≥3	≥55HRC
重型载 货汽车	45	正火	—	氮碳共渗 570℃ × 180min	0.9 ~ 1.2	≥300HV10
	QT900-2	正火 + 回火	280 ~ 321	—	—	—
	35CrMo	调质	216 ~ 269	感应淬火、回火	3 ~ 5	53 ~ 58HRC
大功率 柴油机 汽车	QT600-3	正火 + 回火	240 ~ 300	—	—	—
	35CrNi3Mo	调质	—	渗氮 490℃ × 60h	≥0.3	≥600HV
	35CrMo	调质	—	离子渗氮 515℃ × 40h	≥0.5	≥550HV0.1
	QT600-3	正火 + 回火	—	离子渗氮 510℃ × 120h	≥0.7	≥600HV

曲轴的感应淬火是热处理工艺中的重要工序，是曲轴轴径硬化的必备措施。常见的曲轴感应器有两类，一是整圈分开式感应器，用于曲轴静止不动条件下的表面淬火；另一种为半圈淬火感应器，曲轴在感应器内作旋转运动。频率根据轴径而定，一般直径小于 50mm 为 8000Hz，大于 50mm 时为 2500Hz 即可。

曲轴的半圈感应器最常用，应用范围广。它是由有效圈、外护板、定位块和

淬火冷却装置四个主要部分组成的,具体如图2-11所示。其中的有效圈是用异性纯铜管焊接而成的一个串联成“吕”字形的半圆导体,有效圈的示意图如图2-12所示。它的形状是由4根轴向导线和4根圆弧导线组成的两个“口”字形线圈串联形成的,其围成半圆弧形扣在轴径上,8根有效导线与轴径表面的间隙为1.5~2mm。4根轴向导线产生横向磁场,产生的轴向感应电流加热轴径,曲轴以60~100r/min的速度旋转,喷水冷却,一般在导线上装有“Π”形硅片导磁体。

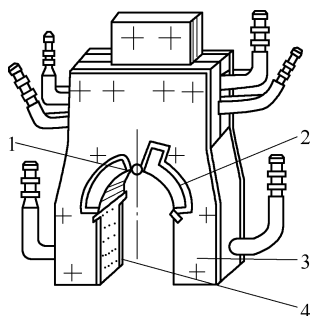


图 2-11 曲轴半圈淬火感应器示意图

1—定位块 2—有效圈 3—外护板 4—淬火冷却装置

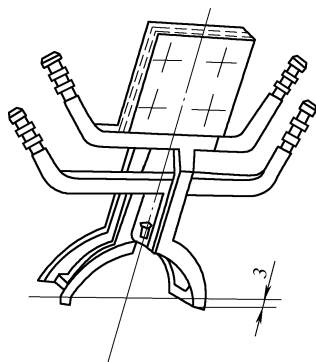


图 2-12 曲轴半圈感应器原理示意图

曲轴经感应淬火后,其轴径和曲柄连接的圆角处未淬火处理,因此会产生较大的拉应力,降低了曲轴的疲劳强度。对于大功率的汽车曲轴应采用轴径和圆角同时淬火的热处理工艺方法,该方法的特点为在原半圆感应器的基础上,将有效弧形段截面的厚度加以改变,并捆上导磁体,目的是使曲轴圆角和轴径同在较强的感应器下被加热淬火,获得理想的淬火效果和一定的残留压应力。

资料介绍球墨铸铁采用上述方法处理后,曲轴的疲劳寿命大大提高。对曲轴轴径、圆角同时感应加热时,在保持硬化层深度的前提下,还要特别注意其形状和分布情况。理想的硬化层截面分布为整个圆角处完整延续并呈圆弧过渡。

目前国际上通用的曲轴圆角淬火技术是在圆弧导体上加上硅钢片导磁体,使中频电流流向圆弧导体的外侧,得到包括轴径两端圆角在内的硬化层,这种硬化层的合理分布可大大提高曲轴的疲劳强度。曲轴圆角淬火感应器及硬化层分布如图2-13所示。495曲轴的圆弧硬度分布曲线如图2-14所示。

6100 发动机曲轴轴径与感应器有效圈尺寸的关系见表2-24。

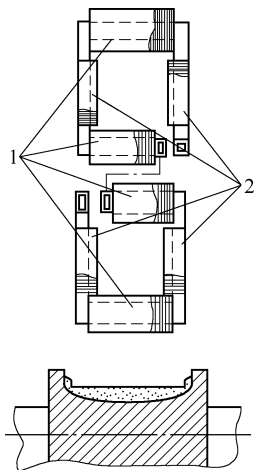


图 2-13 曲轴圆角淬火感应器及硬化层分布

1—轴径表面加热用导电体 2—圆角加热用导电体

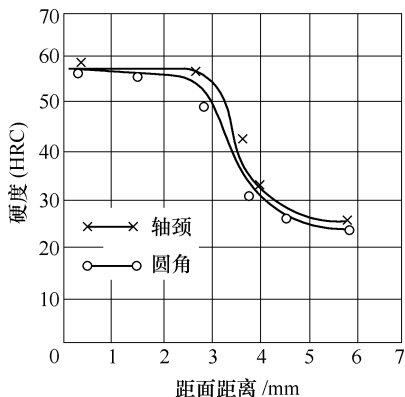


图 2-14 495 曲轴的圆弧硬度分布曲线

表 2-24 6100 发动机曲轴轴径与感应器有效圈尺寸的关系

轴径的类型	轴 径 尺 寸		有效圈的尺寸		
	直径/mm	宽度/mm	有效圈的形状	直径/mm	宽度/mm
连杆轴径	64	37.46 ~ 37.66	大于半圆 3mm	69	34
小主轴径	76	35.75 ~ 35.90		81	32
大主轴径	76	43.61 ~ 43.71		81	40

采用整圈分开式感应器，使曲轴静止加热淬火，有两个缺点：①曲柄相对磁场屏蔽，会造成曲轴轴径和径向各部分的加热温度产生极大的差别，故表面硬度不均匀；②曲轴静止加热，淬火后轴径周围硬化层深度不均匀。而采用半圆淬火感应器、曲轴本身旋转的加热方法则克服了整圈淬火的缺点，即具有硬化层深度均匀、宽度一致，减小曲轴淬火变形量，阻止轴径上油孔出现淬火裂纹等优点，因此在曲轴的实际感应淬火中采用该工艺方法。

6100 发动机曲轴感应加热的电参数和淬火工艺规范见表 2-25。这里以材料 QT600-3 为例，感应淬火前曲轴正火硬度为 220 ~ 260HBW，感应圈与轴径的间隙为 2mm。

(5) 曲轴的化学热处理 曲轴的化学热处理包括离子渗氮、气体氮碳共渗等，为了提高曲轴的表面硬度，获得良好的耐磨性、疲劳强度和高的耐蚀性，通常大功率柴油机曲轴采用离子渗氮（或气体渗氮）的方法，它具有渗层厚、时间长、设备复杂等特点。汽车和拖拉机用曲轴一般采用铁素体氮碳共渗的方法，其特点为渗层薄、摩擦因数低，因此提高了曲轴的抗咬合、抗擦伤能力，获得了高的疲劳强度

和耐磨性等。其工艺特点为温度低、时间短、化学处理后变形小、节能等，因此大部分曲轴普遍采用该工艺。

表 2-25 6100 发动机曲轴感应加热的电参数和淬火工艺规范

曲轴轴径 类型	变压器 匝数比	感应电参数				感应加热淬火工艺规范				硬化层 深度/mm
		电压/V	电流/A	功率 /kW	功率 因数	加热 时间/s	提前冷 却时间 /s	冷却 时间/s	水压/MPa	
连杆轴径	13/2	720	155	100	0.93	10.2	0.5	3.7	0.1	2.5 ~ 4.5
小主轴径	14/2	620	190	88	0.96	9.8	0.5	4.8	0.2 ~ 0.3	2.25 ~
大主轴径	13/2	620	165	95	0.85	10.4	0	4.8	0.35	4.25

表面热处理和化学热处理同普通的热处理工艺相比，可获得最佳的表面硬化层，提高了曲轴的疲劳强度、抗弯强度，曲轴具有良好的耐磨性、耐蚀性等。热处理方法对球墨铸铁曲轴耐磨性的影响见表 2-26，硬度不足将造成性能和使用寿命的降低，而过厚的硬化层会增大曲轴的脆性和内应力，出现早期的失效和损坏，因此工艺方法对曲轴的寿命有重大的影响。

表 2-26 热处理方法对球墨铸铁曲轴耐磨性的影响

材 料 牌 号	热处理状态	磨痕宽度/mm	磨损量/ μm	失重/g
QT600-3	正火	1.75	0.05	0.48
QT600-3	等温淬火	1.30	0.05	0.14
QT600-3	气体氮碳共渗	1.10	0.04	0.08
QT600-3	气体氮碳共渗	1.00	0.04	0.06

目前对球墨铸铁采用了热处理强化和冷加工复合强化新工艺，即球墨铸铁曲轴经热处理后再进行滚压处理。如正火 + 滚压轴颈与曲柄臂过渡圆角处，在表面形成了 0.5mm 的冷加工硬化层，增大了残留压应力的作用，提高使用寿命 70% 以上，效果十分明显，在生产中得到了十分广泛的应用。

目前曲轴氮碳共渗有液体氮碳共渗、气体氮碳共渗两种。液体氮碳共渗具有时间短、渗速快、质量稳定等特点。国内某柴油机厂对曲轴进行液体氮碳共渗，采用德固萨氮碳共渗基盐（TF1）和氧化盐（AB1）处理曲轴效果不错。国内大部分曲轴制造厂采用国产氮碳共渗基盐（CJ-1、TJ-2、TJ-3）和氧化盐（Y-1）对曲轴进行化学热处理。液体氮碳共渗后的盐浴有轻微毒性，会造成环境的污染，故需要进行中和处理。而采用含氧气氛的气体氮碳共渗，则可避免出现环境污染问题。495 柴油机曲轴气体氮碳共渗工艺规范如图 2-15 所示。

球墨铸铁的成分、铸造和热处理工艺对其使用性能有重大影响，因此应严格控制各工序的技术参数。铸态曲轴应无石墨漂浮、皮下气孔和疏松等，一般球墨铸铁曲轴的热处理工艺曲线如图 2-16 所示。常见球墨铸铁曲轴的化学成分见表 2-27。

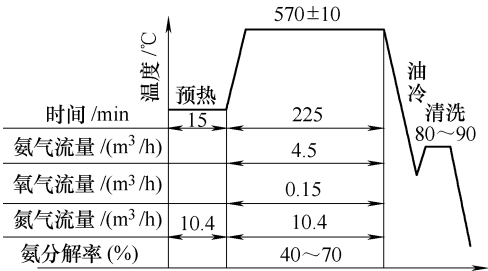


图 2-15 495 柴油机曲轴气体氮碳共渗工艺规范
(QT600-3、原始硬度为 229~302HBW，
渗层深 0.10~0.16mm)

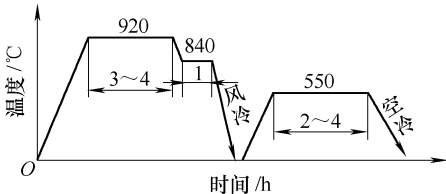


图 2-16 球墨铸铁曲轴的热处理工艺曲线

表 2-27 常见球墨铸铁曲轴的化学成分

序号	化学成分（质量分数,%）								材料牌号
	C	S	Mn	P	S	Mg	RE	其他	
1	3.80 ~ 4.05	2.0 ~ 2.3	0.6 ~ 0.8	≤0.1	≤0.3	0.025 ~ 0.45	0.02 ~ 0.035	—	QT600-3
2	3.7 ~ 3.9	2.0 ~ 2.3	0.5 ~ 0.8	≤0.1	≤0.025	0.03 ~ 0.045	0.025 ~ 0.04	—	QT600-3
3	3.0 ~ 3.5	2.4 ~ 2.8	0.3 ~ 0.5	≤0.1	0.03 ~ 0.035	0.045 ~ 0.05	0.04 ~ 0.05	Cu 0.35 ~ 0.40	QT600-3
4	3.6 ~ 3.8	2.1 ~ 2.4	0.35 ~ 0.50	≤0.075	≤0.03	0.045 ~ 0.07	0.03 ~ 0.05	Mo 0.25 ~ 0.35 Cu 0.50 ~ 0.7	—
5	3.5 ~ 3.7	2.4 ~ 2.6	0.7 ~ 0.9	0.06 ~ 0.08	0.012 ~ 0.018	0.04 ~ 0.06	0.03 ~ 0.05	—	QT600-3
6	3.7 ~ 4.2	2.4 ~ 2.6	0.5 ~ 0.8	≤0.1	≤0.02	>0.04	—	—	—
7	3.0 ~ 3.5	2.2 ~ 3.0	0.5 ~ 0.8	≤0.1	≤0.03	0.02 ~ 0.05	0.03 ~ 0.06	—	—
8	3.5 ~ 3.8	1.8 ~ 2.2	0.5 ~ 0.8	≤0.1	≤0.03	0.045 ~ 0.05	0.035 ~ 0.05	—	QT600-3
9	2.82 ~ 4.06	2.28 ~ 2.56	0.31 ~ 0.36	0.024 ~ 0.04	0.01 ~ 0.03	0.032 ~ 0.049	0.029 ~ 0.051	V0.032 ~ 0.049 Ti0.09 ~ 0.11	

为了获得高强度、高韧性和高耐磨性的综合力学性能，对球墨铸铁曲轴进行等温淬火，可获得下贝氏体组织。曲轴的毛坯应经过完全奥氏体化正火，使自由渗碳体体积磷共晶符合技术要求，同时使珠光体的体积分数在 75% 以上，这样才能为曲轴等温淬火的快速加热创造条件。球墨铸铁曲轴的等温淬火工艺规范如图 2-17 所示。

采用贝氏体等温淬火获得了以下贝氏体为主的组织，其具有强度高、耐磨性好、疲劳强度高等优良性能。球墨铸铁的上、下贝氏体的分界温度约为 300℃，因此等温温度应严格控制。等温淬火工艺为 880℃ × 15min，260 ~ 280℃ × 60min，既可防止温度升高到 300℃ 以上生成上贝氏体，同时也避免了因温度过低造成的马氏体数量增加、冲击韧度下降的质量缺陷。

S195 曲轴经不同热处理后的性能对比见表 2-28。从表中可以看出，经正火处理的曲轴中频感应淬火后有最高的使用寿命和高的耐磨性，成本低，能耗少。因此，曲轴采用正火 + 中频感应淬火的热处理工艺是十分适宜的。

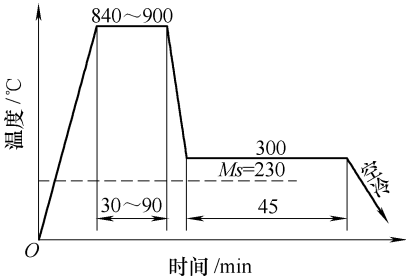


图 2-17 球墨铸铁曲轴的等温淬火工艺规范

表 2-28 S195 曲轴经不同热处理后的性能对比

热处理工艺	组织	硬化层深度/mm	疲劳弯矩/ N · m	安全系数 (n)	耐磨性 /(mm/ 1000h)	大修期/h	使用寿命/h	工艺成本/ (元/根)	价值系数
铸态 + 等温 淬火 880℃ × 40min + 280℃ × 60min	下贝氏体 + 少量马氏体 + 少量残留 奥氏体	≥5	1720	21.5	0.17	5900	23 600	4.6	2.3
正火 + 氮碳共渗 920 ~ 940℃ × 90min 空冷，570℃ × 210 ~ 240min 油冷	化合物层深 8 ~ 12μm， 扩散层深 0.12mm	—	1870	2.8	0.089	11 200	11 200	5.76	1.2
正火 + 感应 淬火 920 ~ 940℃ × 90min 空冷， 中频感应淬火 + 400℃ × 80min 回火	回火托氏体 + 少量回火 马氏体	2 ~ 5	1213	1.75	0.13	7700	30 800	3.61	3.84

4. 热处理工艺分析与操作要点

- 1) 采用锻造余热淬火、回火或锻后空冷正火，可达到节能、改善切削加工性、提高曲轴质量的效果，采用非调质钢同样可获得理想的结果。
- 2) 曲轴的加热温度为 860 ~ 900℃（以 45 钢为例），中频感应淬火的加热时间一般与功率的大小有关，冷却时间为加热时间的 0.9 ~ 1.2 倍。此时水压为 0.015 ~ 0.4MPa，水温为 18 ~ 35℃。球墨铸铁曲轴采用的加热温度为 900 ~ 950℃，在 300℃ 左右进行自回火后，仍需在 180 ~ 220℃ 补充一次回火处理，可有效防止变形与开裂。
- 3) 曲轴上油孔与轴颈表面交接处的孔壁很薄，淬火加热时此处升温速度快、温度高，而冷却时降温速度快，因此会产生油孔裂纹。特别需要注意的是，在感应器的有效圈上镶入硅钢片导磁体，可有效防止曲轴油孔出现 C 型淬火裂纹。
- 4) 防止出现淬火开裂的方法包括：严格控制硬化层深度；在孔洞中打入铜棒，堵塞喷水孔；降低加热的比功率，减缓加热速度，提高传热效果，提高油孔（洞）周围温度的均匀性和提高自回火温度等。
- 5) 曲轴除了出现淬火开裂以外，在热处理后的磨削过程中，由于进行高速磨削会出现磨削裂纹，有时出现龟裂、裂纹局部凸出表面和鼓起等，甚至有薄片的剥落。磨削裂纹产生的过程实际上是淬火的过程，高速磨削的砂轮与工件接触处温度可达 1000℃ 左右，磨削过程中需要不断地向砂轮和工件喷射切削液，其目的是对砂轮和工件降温、在磨削过程中加以润滑、冲洗砂轮防止砂轮微孔被磨粒等塞满。
- 6) 为了提高曲轴的疲劳强度，所有的表面强化方法都是为了在轴颈表面，尤其是在圆角部位形成有效的压应力层。经验表明，各种表面强化方法对提高曲轴疲劳强度的贡献从小到大依次为离子渗氮、气体氮碳共渗、液体氮碳共渗、轴颈感应淬火复合圆角滚压强化、轴颈与圆角感应淬火，应进行合理的工艺选择。
- 7) 曲轴的感应淬火与表面处理检测项目见表 2-29。

表 2-29 曲轴的感应淬火与表面处理检测项目

热处理类型	项目或工艺方法	钢	球 墨 铸 铁
感应淬火	淬硬层深度/mm	2.0 ~ 4.5	1.5 ~ 4.5
	硬度 HRC	45 钢等 55 ~ 63 合金结构钢 ≥ 53	42 ~ 55
	硬度散差要求	≤ 6HRC	
	显微组织细针状马氏体	3 ~ 7 级	3 ~ 6 级
	表面无缺陷	无裂纹、无表面烧伤	
表面处理	氮碳共渗	渗层 ≥ 0.10mm，硬度 ≥ 420HV0.1	
	离子渗氮	渗层 ≥ 0.15mm，硬度 ≥ 500HV0.1	

5. 曲轴的常见感应淬火缺陷和防止措施（表 2-30）

表 2-30 曲轴的常见感应淬火缺陷和防止措施

缺陷名称	产生的可能原因	防止措施
淬硬层分布不均匀	① 轴径与感应器不同心 ② 感应器内电流分布不均匀 ③ 存在油孔 ④ 感应器喷水孔不均匀	① 调整定位装置，防止零件偏心，确保符合技术要求 ② 配置导磁体 ③ 堵塞油孔 ④ 合理布置喷水孔
油孔处存在放射状裂纹	① 油孔处加热不均匀或局部过热，晶粒粗大，油孔的表面粗糙度高 ② 冷却不均匀或过于激烈	① 堵塞油孔或配置导磁体，降低油孔的表面粗糙度 ② 用半圈感应器加热和浸水冷却，改善冷却条件
C 型裂纹和表面剥落	① 锻造折叠 ② 淬硬层太深或不均匀 ③ 油孔淬火裂纹扩展 ④ 回火温度低 ⑤ 磨削时表面冷却不佳	① 合理改进锻造工艺 ② 油孔堵塞 ③ 改进油孔设计 ④ 提高回火温度，符合工艺要求 ⑤ 改进曲轴的磨削工艺
淬火过渡区裂纹	① 淬火应力太大 ② 磨削冷却不当 ③ 正火温度过高，奥氏体发生二次再结晶，降低了材料的韧性	① 确保感应器与轴径同心 ② 改进磨削工艺（控制磨削余量、磨削条件和改善冷却方式等） ③ 合理选择热处理工艺参数
表面网状裂纹	① 表面过热或冷却过快 ② 淬硬层太深或回火温度低 ③ 磨削量太大	① 适当降低加热温度或比功率 ② 保证感应器与轴径间隙合理 ③ 降低水压、提高水温，或提高自回火温度 ④ 改进冷却速度
硬度不足以及软点和软带	① 材料含碳量低或有带状组织 ② 淬火温度低 ③ 冷却水压力低或水温高 ④ 感应器喷水孔部分堵塞	① 调整化学成分和组织合格 ② 延长加热时间 ③ 适当提高冷却水压力或降低水温 ④ 清理感应器上的喷水孔

6. 曲轴的表面强化技术

曲轴的表面强化技术包括氮碳共参与圆角滚压工艺等，其中滚压和喷丸强化工艺已经得到了较为广泛的应用。曲轴在工作过程中要承受高压、交变载荷的作用，因此必须采用表面强化工艺。表面强化既可采用化学热处理的方法，改变零件

表面的组织、成分和性能,满足技术要求;也可使用机械的方法,使零件局部的表面状态发生变化,形成残余压应力,提高疲劳寿命等;另外对零件进行表面感应淬火等,同样可获得较高的强度和使用寿命。根据曲轴的工作条件和使用状况,可采用上述工艺措施实现曲轴的表面处理。在不改变曲轴材料和结构的条件下,采用热处理和机械的强化方法,实现曲轴表面强化的效果十分明显。机械的强化方法为喷丸和圆角滚压;热处理的强化方法有淬火、调质、正火、表面淬火、等温淬火等,化学热处理的强化方法有多种,如渗氮、氮碳共渗、硫碳氮共渗、氧碳氮共渗、碳氮共渗、渗碳等。表面强化又分为前期强化、中期强化和后期强化三种,经过比较后期强化处理的效果最为明显。曲轴采用了对轴径表面和圆角进行强化处理的方法,提高了轴径表面的硬度和耐磨性。

综合归纳出表面强化的作用有以下几点:使表面残留奥氏体诱变为马氏体,强化了非马氏体组织,同时产生冷作硬化;细化了表层组织,降低了表面粗糙度,提高了表层的硬度;消除磨削加工产生的残余应力;提高了疲劳强度和抗应力腐蚀的能力;延长了弯曲疲劳裂纹萌生期及降低了裂纹的扩展速率。

(1) 曲轴的圆角滚压工艺 在曲轴的曲柄和轴径过渡圆角等应力集中部位,采用机械方法对圆角表面进行滚压,实现表面冷加工硬化,故形成残余压应力表面层,同时可消除切削加工的痕迹以及亚微观裂纹,并使内圆角的几何形状精确,因此可提高曲轴的疲劳强度。通常曲轴圆角滚压工艺具有以下特点:工艺简单,生产周期短,制造成本低;使用范围广,可滚压所有材料的曲轴;明显提高曲轴的疲劳强度;表面硬度提高,耐磨性提高;采用圆角滚压可减少磨削时间,提高砂轮的寿命;可消除表面的显微裂纹、针孔、气孔等曲轴的铸造缺陷;滚压硬化层的深度和最大残余应力值,取决于采用的压力、滚轮的形状、尺寸大小和曲轴的材料。

(2) 喷丸强化工艺 除采用表面滚压工艺外,喷丸强化也收到了良好的效果。用压缩空气将大直径的 $0.4 \sim 2\text{mm}$ 的丸粒(如铸铁丸、钢丸、铝丸和玻璃丸等)以 $35 \sim 50\text{m/s}$ 的速度,高速喷射到曲轴表面,其表面产生很大的塑性变形,表面产生冷作硬化,故存在较大的压应力作用。对表面粗糙度 Ra 值为 $2.5 \sim 5\mu\text{m}$ 的曲轴,使用直径 0.7mm 的钢丸喷射后的表面粗糙度 Ra 值变为 $0.32 \sim 0.63\mu\text{m}$,明显改善了表面质量。常用的钢丸粒是切得很短的钢丝(呈球状),用小丸粒可对曲轴的凹槽和凸起、过渡圆弧处进行强化处理,在实际强化处理过程中,压缩空气喷丸和机械喷丸的效果一致,喷丸机的性能不同其相应的技术参数也有区别,应根据具体的设备性能和曲轴的技术要求进行选择,形状复杂的零件等强化后的使用寿命成倍提高。

对表面进行喷丸强化的作用有:提高了疲劳强度,延长了构件的寿命;在寿命相同的条件下,提高了承载能力;可减小零件的尺寸和质量;降低了对精加工尺寸的要求;降低了制造成本;使用满足高强度要求的零件,不必担心出

现缺口敏感性。

2.3.2 飞轮

1. 工作条件与技术要求

飞轮的主要功用是储存做功行程能量,用于克服进气、压缩和排气行程的阻力和其他阻力,使曲轴能均匀地旋转。飞轮外缘压有的齿圈与起动机的驱动齿轮啮合,供起动发动机用;汽车离合器也装在飞轮上,利用飞轮后端面作为驱动件的摩擦面,用来对外传递动力。

飞轮是高速旋转件,因此,要进行精确地平衡校准,平衡性能要好,达到静平衡和动平衡。飞轮是一个很重的圆盘,用螺栓固定在曲轴后端的接盘上,具有很大的转动惯量。飞轮的大部分质量集中在轮缘上,飞轮轮缘上镶有齿圈,齿圈与飞轮紧配合,有一定的过盈量。

2. 材料的选用

一般飞轮多采用灰铸铁制造,如 HT200、HT250。当轮缘的圆周速度超过 50m/s 时,应选用球墨铸铁或铸钢制造,如 QT450-10、QT600-3、QT500-7 等,而国外也采用 45 钢制作的飞轮。

3. 热处理工艺

需要注意的是,曲轴的正时齿轮一端和飞轮一端在等温淬火后要进行机械加工,因此要防止其硬度过高。正时齿轮一端加一轴套,而飞轮一端在等温淬火后,在盐浴炉中进行快速的局部退火,即 900~950℃ 加热、保温 2~3min 后空冷,使该部分硬度控制在 240~290HBW,其余部分的硬度一般在 42~48HRC。通常球墨铸铁曲轴等温淬火后不再进行回火处理,如果硬度超过工艺要求,如要求硬度为 47~49HRC,则进行 380℃ 回火即可。

参 考 文 献

- [1] 董铁有. 汽车构造(发动机) [M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 侯家驹. 汽车制造工艺学 [M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [3] 徐志刚. 汽车构造 [M]. 北京:人民交通出版社,1991.
- [4] 李书常. 简明典型金属材料热处理实用手册 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [5] 安继儒,刘耀恒,等. 热处理工艺规范数据手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [6] 马伯龙. 热处理工操作质量保证指南 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [7] 赵德寅,王大伦. 汽车零件金相分析 [M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [8] 王忠诚,齐宝森,李扬. 典型零件热处理技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [9] 郭伯翔. 活塞环 [M]. 北京:中国铁道出版社,1987.
- [10] 赵明好. 无污染盐浴氮碳共渗在内燃机零件上的应用 [J]. 内燃机配件,2005 (2): 35-38.

- [11] Richard F, et al. 现代汽车技术 [M]. 杨占鹏, 梁桂航, 于京诺, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第2卷 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 王广生, 等. 金属热处理缺陷分析及案例 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [14] 朱元浦, 侯增寿. 金属热处理问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [15] 职业技能鉴定教材编审委员会. 热处理工 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 1996.
- [16] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [17] 陈琦, 彭兆弟. 铸件热处理应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [18] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [19] 浙江大学, 上海机械学院, 合肥工业大学. 钢铁材料及其热处理工艺 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1975.
- [20] 李泉华. 热处理实用技术 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [21] 樊新民. 热处理工实用手册 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2010.
- [22] 朱维翰, 赵平顺, 陈荣仙, 等. 金属材料表面强化技术新进展 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.

第 3 章

配气系统零部件的热处理

3.1 概述

汽车配气系统的作用是按发动机每一气缸内所进行的工作循环和点火次序要求,定时开启和关闭进、排气门,使新鲜的充气(汽油机为可燃混合气,柴油机为空气)得以及时进入气缸,并迅速将废气及时排出气缸。它是决定发动机性能的重要机构,气门式配气系统是由气门组和气门传动组等零件组成的。该系统的主要部件有凸轮轴、气门以及相关零件等,图3-1所示为一般发动机的气门驱动系统,从图中可以看出由活塞驱动的曲轴带动传动带、凸轮轴运转,然后顶压气门(或气阀),来完成开闭的全过程。

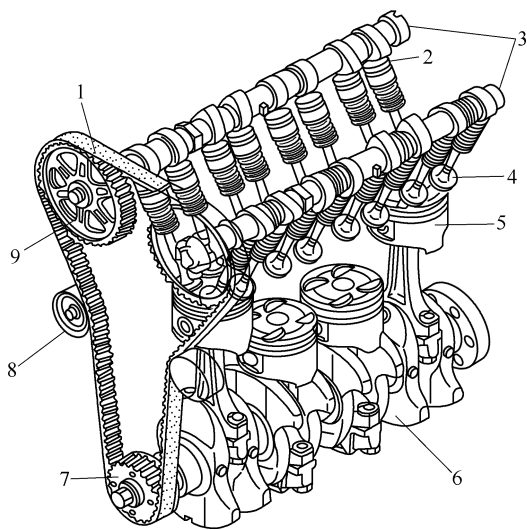


图 3-1 一般发动机的气门驱动系统

- 1—正时皮带 2—液压式气门间隙自动调节装置
3—凸轮轴 4—气门 5—活塞 6—曲轴
7—曲轴皮带轮 8—张紧轮 9—凸轮轴皮带轮

3.1.1 气门组的构成与作用

气门及其相关零件通称为气门组,安装在气缸盖上的进、排气门能够平稳工作,完全是组成气门组的多个零件共同作用的结果。

1. 气门

发动机是汽车、拖拉机、内燃机车、船舶与舰艇、工程机械、坦克、活动电站

等的动力源，而气门是发动机的关键部件，气门用材包括合金结构钢、耐热钢、高温合金等，通常进气门工作温度在 400°C 以下，而排气门则在 $500 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 的高温燃气腐蚀介质中，要求有足够的高温强度、塑性、硬度和良好的耐蚀性。

气门由头部和杆部组成，气门头部有 30° 或 45° 的锥面，通常进气门的锥面为 30° ，而排气门为 45° 。要求气门杆与圆弧的过渡部分圆滑，以提高强度，改善头部的散热性，从而减小气流的阻力。气门杆部为圆柱形，是气门运动的导向部分，磨光的表面与气门导管保持一定的间隙，以减少磨损和有利于较好的散热。气门尾端由于气门弹簧座的固定方式不同，有不同的结构，一种在气门杆部的尾端制有环槽，另一种在其尾端制有锁孔，根据发动机的要求不同可进行选择。

2. 气门导管

气门导管为一个空心的圆柱体，使气门杆部从其中穿过，为气门的支撑导向零件。气门导管能够保证气门沿自身的轴线下上运动，使气门与气门座能正确地贴合和对中，同时使气门头部热量的一部分通过气门杆向气缸盖散发。气门导管是嵌压在缸盖的孔中的，其工作温度在 200°C 左右。气门杆部在其中运动时，仅靠配气系统飞溅的机油润滑，因此导管磨损严重，大多采用灰铸铁、球墨铸铁或铁基粉末冶金材料制造。为保证正常的工作，气门杆与气门导管的间隙为 $0.05 \sim 0.12\text{mm}$ ，以确保气门杆部的上下运动。气门导管及其安装如图 3-2 所示。

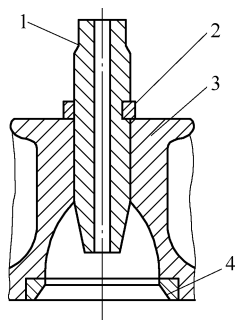


图 3-2 气门导管及其安装

1—气门导管 2—卡环
3—气缸盖 4—气门座

3. 气门油封

它是一橡胶密封圈，主要起密封气门导管、防止机油泄漏到气缸内的作用。

4. 气门弹簧座

气门弹簧座为气门的弹簧基座，它由上、下两个金属环状的气门弹簧座组成。

5. 气门弹簧

气门弹簧是由弹簧钢丝卷制成的圆柱形螺旋弹簧，是提供关闭气门作用力的零件，气门是由凸轮轴顶压打开的，气门的关闭则是靠弹簧的反弹力将气门压向凸轮来实现的。安装时将气门杆部插入导管中，在导管与气门外套装弹簧，再装上弹簧座，然后将锁片嵌入气门杆部的切槽中。

6. 气门锁片

通过气门导管、气门弹簧等来固定气门的锁止零件。

7. 气门座

安装在气门的进、排气孔上，气门关闭时确保气门的工作面与气门座的工作面紧密贴合，来防止混合气体的泄漏。气门组的构成如图 3-3 所示。

气门组（气门及相关零件）：配置一根气门弹簧的标准型的进、排气门机构的组成零件。气阀组件的结构示意图如图 3-4 所示。

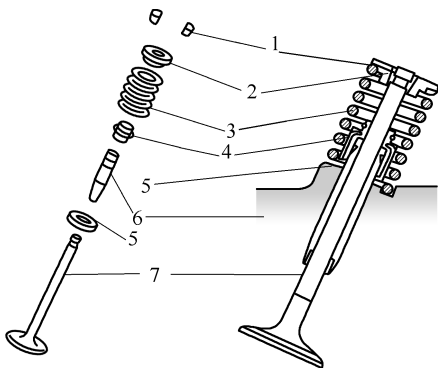


图 3-3 气门组的构成

1—气门锁片 2—气门弹簧上座 3—气门弹簧
4—气门油封 5—气门弹簧下座 6—气门导管 7—气门

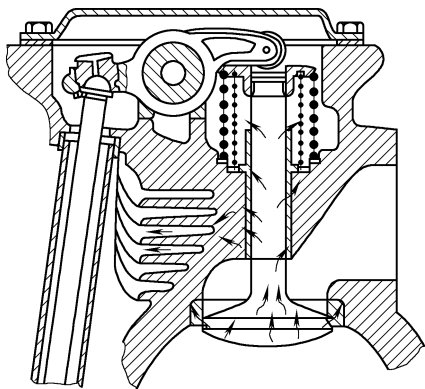


图 3-4 气门组件的结构示意图

3.1.2 气门传动组的构成与作用

发动机的配气系统除了气门组以外，与之密切相关的是气门传动组，它是由凸轮轴、正时齿轮、挺杆以及推杆、摇臂和摇臂轴等组成的，其作用为使进、排气门能按配气系统的要求定时开启和关闭气门，并保证气门有足够的开度，确保发动机的正常工作。

1) 凸轮轴。凸轮轴用于控制气门开闭，并驱动燃油泵、机油泵和分电器等工作。凸轮轴上有进气凸轮、排气凸轮、轴颈、驱动机油泵及分电器的齿轮、推动燃油泵摇臂的偏心轮等，进气和排气凸轮是凸轮轴的重要组成部分，它们在凸轮轴上的排列顺序由进、排气道的布置来决定。

2) 正时齿轮及正时链条或正时带轮。曲轴与凸轮轴的传动通常是由正时齿轮、正时链条或正时传动带来完成的，四冲程发动机曲轴旋转两周，凸轮轴旋转一周，使进、排气门各开、闭一次，并且气门开闭时机须与各缸工作循环的需要相适应。

3) 气门挺杆。挺杆的作用是将凸轮的推力传给推杆或气门。挺杆的类型有菌式、筒形非液压式、筒形液压式、滚轮式等，筒形液压式挺杆无气门间隙，可以减少发动机的噪声，但精度要求严、成本高，多应用于高级轿车发动机。

4) 气门推杆。其作用是将挺杆的推力传给摇臂，驱动气门开启。推杆的上、下端头经热处理并抛光或磨削，以提高耐磨性，杆身有实心 and 空心两种。

5) 摇臂及摇臂轴总成。其作用是改变推杆（下置凸轮轴式）、挺杆（中置凸

轮轴式)或凸轮(上置凸轮轴式)的推力方向,使气门开启。摇臂轴总成固定在气缸盖上部,主要由摇臂、摇臂轴、汽车发动机轴支座等组成,摇臂制成两臂不等长的形式,这样使挺杆、推杆以较小的升程就能获得气门较大的开度。摇臂长臂一端与气门杆相对应,短臂一端装有调整螺钉及螺母,用来调整气门脚间隙。摇臂轴为空心轴,与摇臂轴支座、摇臂有贯通的润滑油道,以润滑配气机构部分的摩擦表面。

3.1.3 柴油机针阀体的作用

喷油器为由针阀体与针阀组成的一对最重要的精密偶件,针阀体是柴油机上喷油系统的重要部件。在工作过程中,针阀相对于针阀体作高速滑动摩擦,柴油机的闭式喷油器内的针阀是保证按时开启与关闭高压燃油的关键部件。油自斜油道进入针阀体与针阀的环形油腔中,使针阀上端承压锥面受到向上的油压,超过调压弹簧预紧力后,针阀上移,高压喷油经针阀体头部的喷孔喷入燃烧室内。燃油得到雾化,在气缸内灼热空气和加热与燃烧室内较强的空气涡流的作用下,蒸发、扩散、与空气混合,形成浓度极不均匀的可燃混合气,达到一定的自燃温度和混合气浓度后,最后自行发火燃烧做功。

3.2 气门组零件的热处理

3.2.1 气门

1. 工作条件和技术要求

气门是在内燃机工作过程中密封燃烧室和控制内燃机气体交换的精密零件,是保证内燃机动力性能、可靠性和耐久性的关键部件。气门在工作过程中阀口锥面与气缸盖相互接触,气门杆端与摇臂之间发生剧烈的摩擦作用、受到高温气体的冲刷和腐蚀,因此进气门主要承受反复冲击的机械载荷,其工作温度在 $300 \sim 400^{\circ}\text{C}$,而排气门除承受冲击的机械载荷外,还受到高温氧化性气体的腐蚀以及热应力、锥面热箍应力和燃烧时气体压力等的共同作用,排气门的工作温度为 $600 \sim 850^{\circ}\text{C}$,因此在运动过程中气门要承受冲击载荷和燃烧废气的腐蚀等作用,工作条件恶劣。资料介绍,采用气门旋转运动,可在密封锥面上产生轻微的摩擦力,同时还有消除沉积物的自洁作用。发动机速度上升,气门机构的惯性力增大,超过了气门弹簧的张力,从而引起气门的跳动,打乱了气门的调节时间,使充气效率下降,降低了发动机的力学性能。分析气门的工作状态可知气门的下列特性:所受的最高温度在盘部的中心或圆弧与杆部的交接处,因此要求气门有高的热强性和良好的耐蚀性;锥面经受热腐蚀、热疲劳、热磨损的作用,应具有良好的综合力学性能;气门杆部和

杆端面与气门导管、摇臂接触，为重要的磨损区，要求有良好的减摩性和耐磨性。

2. 气门材料的选择

根据气门的工作环境和技术要求，所采用的材料必须具备足够的高温强度和耐磨性、良好的抗氧化性和抗燃气腐蚀性、较高的热导率和较低的膨胀系数等，同时具备优良的冷热加工性和焊接性等。材料的选择应按工作环境、介质和耐久性等几个方面进行综合考虑，气门材料具有高的耐高温性能，在冷热变化的情况下其组织稳定，并有一定的抗氧化性、抗燃气腐蚀性和抗冲击性，能够抵抗动应力的作用，热加工易于成形，切削加工性好。国家标准推荐的气门材料如下：低合金结构钢如 40Cr、45Mn2；马氏体耐热钢如 42Cr9Si2、40Cr10Si2Mo、45Cr9Si2、90Cr18MoV、80Cr20Si2Ni、45Cr9Si3；奥氏体耐热钢如 45Cr14Ni14W2Mo、20Cr21Ni12N（简称 21-12N）、53Cr21Mn8Ni2N（简称 21-2N）、30Cr23Ni8Mn3N（简称 23-8N）、53Cr21Mn9Ni4N（简称 21-4N）、53Cr21Mn9Ni4NbW2N（简称 21-4N + WNb）、60Cr21Mn10MoVNbN；高温合金 GH145（NiCr20TiAl）等。常用气门用钢的原材料硬度见表 3-1。气门用钢应具备的力学性能见表 3-2。

表 3-1 常用气门用钢的原材料硬度

序号	材料分类	钢材牌号	热处理状态硬度 (HBW，不大于)
1	合金结构钢	40Cr	退火 269
2		45Mn2	退火 269
3	马氏体型耐热钢	42Cr9Si2	退火 269
4		45Cr9Si2	退火 300
5		45Cr9Si3	退火 300
6		40Cr10Si2Mo	退火 269
7		8Cr20Si2Ni	退火 300
8		90Cr18MoV	退火 300
9		90Cr18W2V	退火 300
10	奥氏体型耐热钢	45Cr14Ni14W2Mo	固溶处理 255
11		20Cr21Ni12N	固溶处理 209
12		53Cr21Mn8Ni2N	固溶处理 380
13		53Cr21Mn9Ni4N	固溶处理 380
14		53Cr21Mn9Ni4NbW2N	固溶处理 380
15		60Cr21Mn10MoVNbN	固溶处理 380
16		30Cr23Ni8Mn3N	固溶处理 360
17	高温合金	GH145（NiCr20TiAl）	固溶处理 325

表 3-2 气门用钢应具备的力学性能

序号	类别	材 料 牌 号	热处理制度				室温力学性能								
			淬火（固溶）		回火（时效）		屈服强度 R_{cu}/MPa	抗拉 强度 R_m/MPa	伸长率 $A(\%)$	收缩 率 $Z(\%)$					
											温度 /℃	冷却 介质	温度 /℃	冷却 介质	不 小 于
1	合金结构钢	40Cr	850	油	520	水	785	980	9	45					
2		45Mn2			550		750	880	10						
3	马氏体型耐热钢	42Cr9Si2	1020 ~ 1040		700 ~ 800	空气 或水	590	880	19	50					
4		45Cr9Si2	1000 ~ 1050		720 ~ 800		685	900	14	40					
5		45Cr9Si3	1020 ~ 1070				700								
6		40Cr10Si2Mo	1020 ~ 1040		720 ~ 800	空气	680	880	10	35					
7		8Cr20Si2Ni	1030 ~ 1080				800	1000	7	15					
8		90Cr18Mo2V	1050 ~ 1080												
9		90Cr18W2V													
10	奥氏体型耐热钢	45Cr14Ni14W2Mo	1100 ~ 1200	730 ~ 800	310		700	20	35						
11		20Cr21Ni12N			430		820	26	20						
12		53Cr21Mn8Ni2N	1140 ~ 1180		550		900	8	10						
13		53Cr21Mn9Ni4N	1100 ~ 1200	580	950										
14		53Cr21Mn9Ni4NbW2N	1160 ~ 1200	760 ~ 800	800	1000	8	12	15						
15		60Cr21Mn10MoVNbN	1180 ~ 1200	650 ~ 700				10							
16		30Cr23Ni8Mn3N	1150 ~ 1170	800 ~ 830				550	850	20	30				
17	高温合金	GH145（NiCr20TiAl）	1000 ~ 1150		750 ~ 850		750	1100	12	20					

进气门材料可选用 40Cr、45Mn2，其在气缸内的工作温度为 300℃左右，该材料经过调质处理后硬度为 30 ~ 40HRC，因此完全可满足进气门的技术要求；而排气门由于气体的压缩和转速的增大，其要承受 800℃左右的高温作用，需采用性能更加稳定的马氏体型耐热钢、奥氏体型耐热钢与高温合金等。

日本所使用的气门材料通常有马氏体型耐热钢（或称为耐热铁素体钢）和奥氏体型耐热钢两类，前者经过调质处理（淬火 + 高温回火）后硬度为 25 ~

33HRC, 后者进行固溶+时效处理, 硬度在30~38HRC范围内, 比我国气门硬度低3~5HRC。这与日本制造气门材料的冶炼方法、化学成分以及杂质含量低有关。

3. 气门制造工艺流程

气门的制造流程为将棒料加热压制成形, 经过热处理后对气门杆部和气门锥面进行机械加工。气门加工工艺路线是根据设计图样和技术要求、生产纲领和产量、目前的生产条件、加工水平等几个方面来确定的, 安排气门的热处理工序时主要考虑两点: 一是方法适当, 即根据不同材料热处理目的的不同, 科学选择热处理工艺方法; 二是在机械加工的过程中合理和及时安排热处理工序, 特别注意冷热工艺的协调。还要进行必要的经济技术分析, 选择一条技术先进、质量可靠、成本较低的合理的工艺路线, 将气门的热处理安排在最合理的位置, 在工艺流程中应从以下几个方面考虑。

1) 热处理工序和机械加工工序安排要合理。气门的调质处理一般应安排在进行机械加工前; 阀口堆焊合金的气门的热处理, 要考虑堆焊前进行退火处理, 目的是为车堆焊槽做准备; 渗氮气门在粗加工后要安排去应力退火工艺, 以确保渗氮过程中变形小, 尺寸符合图样的技术要求; 气门杆部端面的高频感应淬火或锥面淬火只能布置在机械加工过程后面。

2) 采用先进的热处理设备和技术, 不断优化和简化热处理工艺。整体气门或气门杆的调质处理采用连续式可控气氛炉, 可确保气门的产品质量和生产率, 同时也改善了作业环境。连续式可控气氛炉将气门的淬火和回火合二为一, 改变了过去周期性作业炉热效率低、生产周期长、劳动强度高、工艺装备消耗量大、维修频繁等缺点。对于固溶气门, 淘汰传统的高温箱式炉, 而采用盐浴炉、可控气氛炉或燃气固溶炉加热, 避免了气门表面的氧化和脱碳现象的发生, 又提高了生产率和确保了产品质量, 因此先进的设备和工艺技术是热处理水平提高的基础和核心所在。

3) 缩短生产周期和减少变形。气门作为细长的轴类零件, 加上头部特殊的结构, 在热处理过程中如何减少变形量和缩短工艺时间, 成为热处理工作者的首要任务。事实表明采用垂直吊挂的加热方式, 比气门平放加热的变形小, 前者仅为后者的1/2。同时对马氏体耐热钢气门采取盐浴炉预热和加热相结合的方式, 比井式高温炉加热的时间减少4/5, 缩短了工艺时间, 减少了气门杆部和头部的变形, 经济效益十分明显。

4) 采用表面处理技术, 提高气门的力学性能和使用寿命。气门长期在高温、高压和腐蚀性气体的环境下工作, 同时要承受冲击、磨损的反复作用, 因此为了确保气门杆部满足工作需要, 通常采用表面镀铬或氮碳共渗处理, 提高表面的耐蚀性、耐磨性和疲劳强度, 实践证明, 采用该类技术可明显提高气门的使用寿命。一

般该工序安排在气门的精加工过程中，此时的杆部直径接近成品要求，应当注意控制气门的杆部膨胀量至关重要，要进行表面处理前工艺的验证工作，选择最佳的工艺参数。

气门按加工方式的不同，可分为头杆焊气门、杆杆焊气门和整体气门，另外有堆焊合金气门、中空充钠气门等，不同类型气门的整个加工过程也略有区别，其中气门表面处理的方法有氮碳共渗和镀铬两种。

4. 气门的热处理工艺

对气门热处理的基本要求是表面的含碳量始终保持原来的水平，即不脱碳和无氧化。为了实现上述要求，气门的淬火（或固溶）和回火（或时效）应在可控气氛炉或盐浴炉内进行。国外发动机马氏体钢和合金结构钢气门调质或淬火热处理设备如图 3-5 所示，发动机气门连续热处理炉系统的工作示意图如图 3-6 所示。

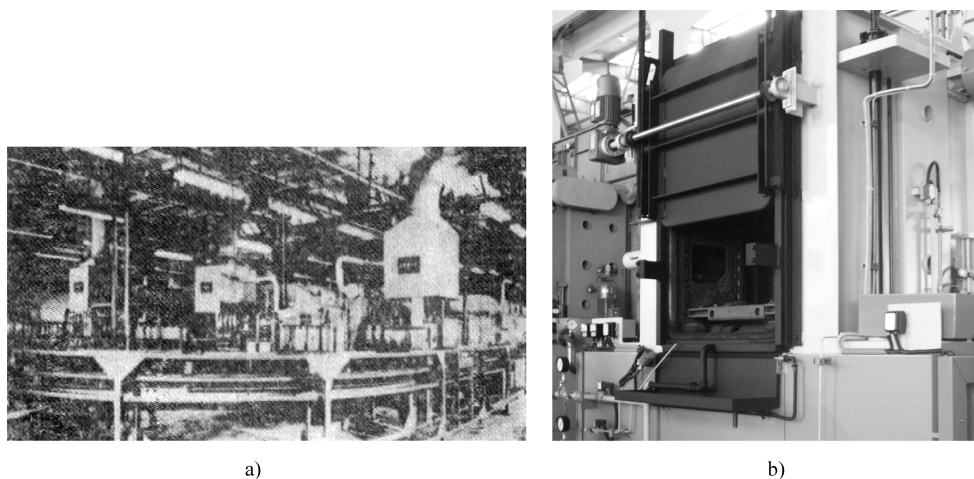


图 3-5 国外发动机马氏体钢和合金结构钢气门调质或淬火热处理设备

a) 连续热处理炉 b) 多用炉

(1) 淬火与回火（调质处理） 对低合金结构钢和马氏体型耐热钢制造的整体气门，热处理的方式为调质处理（淬火 + 高温回火）以得到回火索氏体组织，基体硬度为 28 ~ 40HRC。热处理工艺流程为：淬火 → 一次回火 → 抛丸 → 校直 → 二次回火 → 二次抛丸 → 校直，其热处理工艺规范如图 3-7 所示。

目前国内外气门生产厂家正在努力寻找气门热处理专用设备，来改变笨重、粗放的处理方法，网带式可控气氛中、高温加热炉的各项技术指标已经基本达到了处理气门的要求。图 3-8 所示为目前国内网带炉热处理生产线（淬火 + 回火），其由上料、前清洗、加热冷却、后清洗、加热回火、水冷等工序组成，实现了机械化与

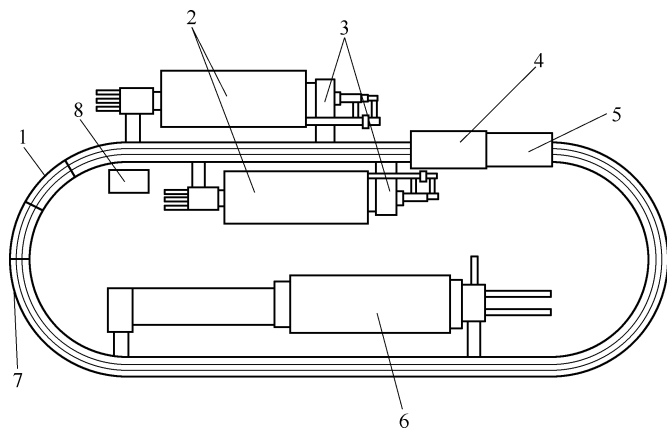


图 3-6 发动机气门连续热处理炉系统的工作示意图

1—装料空间 2—淬火炉 3—油槽 4—除气机
5—干燥器 6—回火炉 7—卸料处 8—液压系统

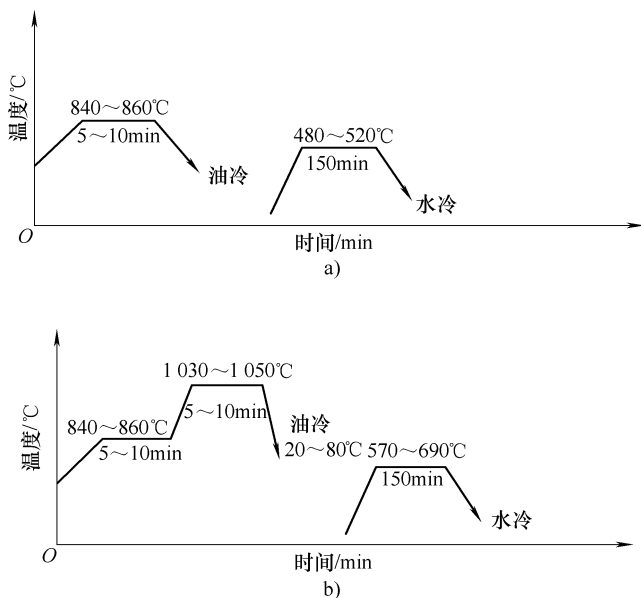


图 3-7 气门盐浴炉热处理工艺规范

a) 低合金结构钢 b) 马氏体型耐热钢

半自动化作业，并通过氧探头进行炉内碳势的控制，热处理产品质量稳定，生产率高。

另外个别气门厂采用深井式高温电阻炉处理马氏体型耐热钢效果良好，但需要通保护性气体，以防止气门的氧化和脱碳，氮气的纯度必须高于 98%。图 3-9 所



图 3-8 目前国内网带炉热处理生产线（淬火 + 回火）

示为气门在高温井式炉内加热时气门杆部氧化实例，图 3-10 所示为气门加热淬火时，工艺装备与淬火槽碰撞造成气门杆部弯曲的情况。由于深井式高温电阻炉出炉时降温幅度大和加热速度慢，也没有办法进行预热，因此保温时间长于盐浴炉加热的时间。



图 3-9 马氏体型耐热钢气门杆部加热氧化腐蚀
(在氮气纯度为 85% 的高温井式炉中加热)



图 3-10 马氏体型耐热钢气门杆部
热处理后弯曲

气门的回火在低温井式炉中进行，保温结束后要水冷，原因是 $42\text{Cr}9\text{Si}2$ 、 $40\text{Cr}10\text{Si}2\text{Mo}$ 等马氏体型耐热钢在 $450 \sim 700^\circ\text{C}$ 范围内有二次回火脆性，因此必须用水快速冷却，水温要低于 80°C 。常见马氏体型耐热钢气门的热处理工艺规范见表 3-3。

(2) 固溶与时效（或仅时效） 整体（或大头）奥氏体型耐热钢的热处理方式固溶 + 时效处理或仅时效处理，一般晶粒度控制在 4 ~ 10 级，其在 700°C 以下具有良好的强度、硬度和较好的耐蚀性。该类材料加热温度低于 980°C 时，表面易

形成裂纹；当温度超过 1200℃ 时，又会因大量 M_7C_3 的薄片沉淀在晶界而出现裂纹。图 3-11 与图 3-12 所示分别为固溶处理采用高温燃气炉与高温盐浴炉的实体照片，前者的效率是后者的 8 ~ 10 倍，成本降低了 80%，是理想的气门固溶加热设备。

表 3-3 常见马氏体型耐热钢气门的热处理工艺规范

材料牌号	淬火工艺规范			回火工艺规范			备 注
	加热温度/℃	冷却介质	淬火硬度 HRC	回火温度/℃	冷却介质	回火硬度 HRC	
42Cr9Si2 40Cr10Si2Mo 42Cr9Si2 45Cr9Si3	1030 ~ 1050	7 号机械油或 0 号柴油，油温不高于 80℃	≥54	550	循环水，温度低于 50℃	41 ~ 45	气门的硬度是指圆柱面硬度，通常最终的硬度依据平面硬度，因此可按圆柱面与平面的修正值，编制相应的回火温度和硬度范围
				590		35 ~ 40	
				610		33 ~ 38	
				630		31 ~ 36	
				650		29 ~ 35	
				670		28 ~ 33	
				690		26 ~ 31	
				710		24 ~ 30	
8Cr20Si2Ni	1040 ~ 1070			650		34 ~ 39	
				670		32 ~ 37	
90Cr18Mo2V	1060 ~ 1080			690		30 ~ 37	
				710		28 ~ 33	



图 3-11 高温燃气固溶炉



图 3-12 高温盐浴固溶炉

时效处理后的气门平面硬度为 23 ~ 38HRC，层状析出物的体积分数 ≤ 15%。气门盐浴炉加热固溶、井式炉时效的工艺规范如图 3-13 所示。

固溶的目的是将合金元素充分溶入固溶体中，快速冷却以抑制合金的析出，获得强化的固溶体，其沉淀相为 $M_{23}C_6$ ，水冷后形成单一的饱和奥氏体，得到适宜的

晶粒度。而时效则使溶质原子在固溶体点阵的一定区域内析出弥散的强化相或组成第二相（碳化物金属间化合物），获得弥散分布的碳化物，提高基体的强度。另外在 1180 ~ 1200℃ 温度下，可有效消除锻造裂纹。固溶温度越高，其效果越好，晶界沉淀相的数量和尺寸随温度的变化而变化。

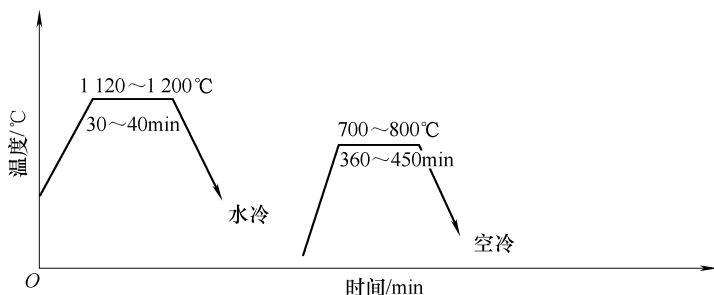


图 3-13 气门盐浴炉加热固溶、井式炉时效的工艺规范

时效的特征为析出的强化相的体积分数 $\leq 15\%$ ，强化相尺寸小、分布均匀，基体固溶体稳定。时效的前提是固溶度随温度的提高而变化，合金化存在双相区；有高的热强性，最高温度决定了析出极限温度；析出物弥散、均匀地分布在基体上，在高温下长期使用时有高的、稳定的晶界强化作用。时效不仅可以消除加工应力，而且可提高基体的强度、硬度和韧性等，在热处理过程中，温度过高会产生层状析出物，析出物为 Cr_{23}C_6 和少量 CrN 。事实上温度过高将造成气门的室温韧性、疲劳强度和耐蚀性降低，因此要严格控制时效温度。图 3-14 ~ 图 3-18 所示为固溶处理的异常缺陷，图 3-19 所示为层状析出物超标的情况。

常见气门用奥氏体型耐热钢的热处理工艺规范见表 3-4。

制造排气门常用的奥氏体型耐热钢为 53Cr21Mn9Ni4N（简称 21-4N），采用不同热处理工艺方法处理后的组织与性能的比较见表 3-5。可以看出只有经过固溶处理才能发挥出钢的特性。

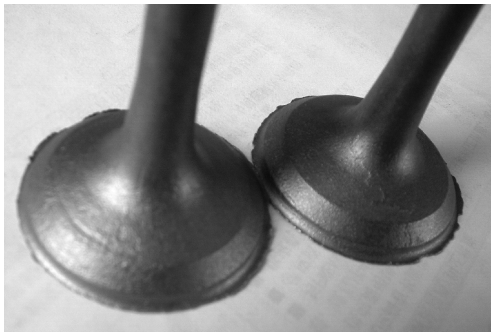


图 3-14 盐浴固溶 + 时效圆弧表面的盐腐蚀



图 3-15 燃气炉内气门圆弧被烧蚀



图 3-16 燃气炉内气门的杆部被烧蚀（凹坑）

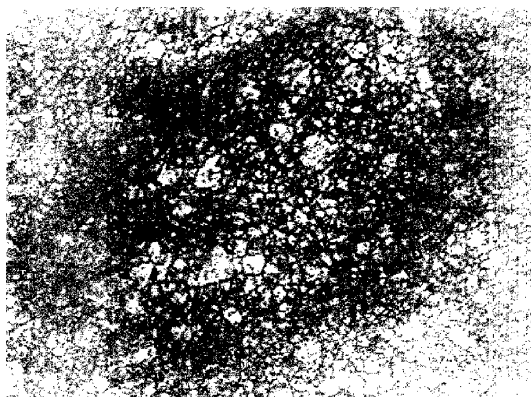


图 3-17 耐热钢固溶黑心 (100 ×)

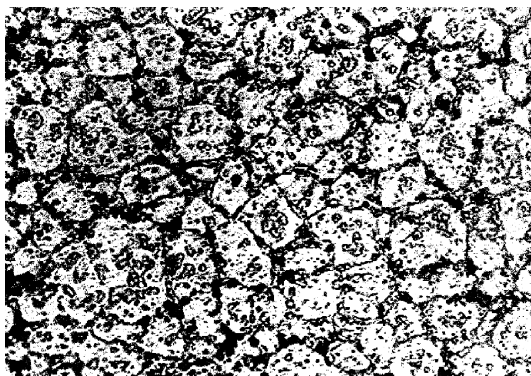


图 3-18 21-4N+WNb 耐热钢固溶过烧组织 (100 ×)

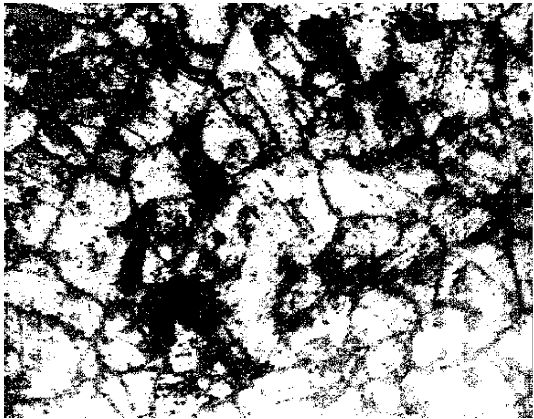


图 3-19 6Cr21Mn10MoVNbN 耐热钢时效析出超标（质量分数≥25%，100 ×）

表 3-4 常见气门用奥氏体型耐热钢的热处理工艺规范

材 料	固溶工艺规范				时效处理工艺规范				
	温度 /℃	晶粒度 /级	硬度 HRC	冷却 介质	温度 /℃	时间/ min	硬度 HRC	析出 物质 量分数 (%)	冷却 介质
45Cr14Ni14	1150 ~ 1180	6 ~ 9	≤36	盐水	750 ~ 770	450	220 ~ 280HBW	≤10	空气
21-2N 21-4N	1140 ~ 1160	4 ~ 10			760 ~ 790		≥30		
21-4N + WNb	1160 ~ 1200	5 ~ 10			750 ~ 780		≥28		
21-12N	1150 ~ 1180	4 ~ 8	25		770 ~ 800		≥16		
23-8N	1130 ~ 1150	4 ~ 10	36		760 ~ 790		≥24		
6Cr21Mn10MoV	1150 ~ 1170	5 ~ 9			700 ~ 730		≥33		
GH145 (NiCr20TiAl)	1000 ~ 1100	7 ~ 10			690 ~ 710	960	≥35	≤15	

表 3-5 21-4N 钢采用不同热处理工艺方法处理后的组织与性能的比较

工 艺 类 型	固 溶 处 理	半固溶处理	中温软化处理
工艺参数	1150 ~ 1180℃ × 0.5 ~ 1h 水冷	1070 ~ 1120℃ × 0.75 ~ 1h 水冷	860 ~ 900℃ × 6h 炉冷
显微组织	奥氏体 + 少量碳化物	奥氏体 + 少量细小均匀分布的碳化物	奥氏体 + 大量细小颗粒状碳化物
晶粒度/级	3 ~ 7	5 ~ 10	9 ~ 11

(续)

工 艺 类 型		固 溶 处 理	半固溶处理	中温软化处理
切削性能		较难加工	较易加工	易切削
电镀锌材率 (%)		30 ~ 90	> 95	90 ~ 98
力学性能	R_m /MPa	710 ~ 1150	1070 ~ 1275	1050 ~ 1128
	R_{eH} /MPa	570 ~ 875	760 ~ 895	758 ~ 765
	A (%)	3.4 ~ 3.6	11 ~ 30	12.4 ~ 33
	Z (%)	4 ~ 32.5	12 ~ 31	12.8 ~ 30
	硬度 (HBW)	≥302	280 ~ 330	295 ~ 310
高温持久强度/MPa	750℃ × 100h	160 (1150℃ 固溶 后水冷, 750℃ 时效 4h 空冷)	125 (1100℃ 固溶 0.5h 水冷, 750℃ 时 效 4h)	60 (900℃ 加热 7h 缓 冷)
	800℃ × 100h	80 (1170℃ 固溶 0.5h 水冷, 750℃ 时 效 8h)	62 (1100℃ 固溶 1.5h 水冷, 750℃ 时 效 8h)	37 (800℃ 加热 6h 缓 冷)

(3) 气门的杆端淬火与锥面淬火 进、排气门作为大批量生产的汽车配件, 马氏体型耐热钢气门杆端面要进行感应淬火处理。热处理后气门杆部的硬度为 30 ~ 40HRC, 而杆端面在工作过程中要与摇臂接触产生摩擦和碰撞, 因此要求气门端面的硬度高、耐磨性好, 这样才能满足发动机工作的需要。高频感应淬火的硬化层厚度为 2 ~ 4mm 或淬透, 硬度 ≥ 50HRC。这里需引起重视的是淬火的热影响区不允许出现在锁夹槽内, 另外对于杆端面和锁夹槽需要表面淬火或淬透的气门, 硬度的分布、长度等要符合工艺的规定。气门杆端部高频感应淬火工艺参数见表 3-6。

表 3-6 气门杆端部高频感应淬火工艺参数

高频设 备型号	屏流 /A	栅极电 流/A	阳极电 压/kV	频率/ kHz	加热 温度 /℃	加热时 间/s	冷却 方式	端面圆 周硬度 HRC	端面中心 硬度 HRC
GP-100	12 ± 2	15 ± 0.5	12 ± 1	200 ~ 250	1060 ~ 1100	0.4 ~ 0.6	空冷 或油冷	56.4 ~ 58	56 ~ 57.5
GGC85-2B	4 ± 0.5	0.5 ± 0.2	9 ± 1					55.5 ~ 57	54 ~ 56

- 1) 进行气门杆部高频感应淬火时, 常采用以下四种感应淬火技术。
- ① 夹缝式感应淬火技术。该技术感应器的两条有效导线平行布置, 也可呈不同半径的弧形线布置, 导线中间的间隙为 10 ~ 20mm, 以满足气门杆部淬火的需要。夹缝式感应器及气门位置如图 3-20 所示。

该感应器两端翘起的目的是有利于气门的进入和移出，加上圆环和邻近电磁效应的叠加，其加热效率高。从图 3-20 中可知气门端面的中心升温很慢，而杆端边缘迅速升温，依靠边缘的热量来提高端面中心的加热温度，该感应器制作简单、方便，故该淬火方法多用于直径细小的气门的端面淬火。

该方法的不足是难以消除端面周边和心部的温差，金相组织粗大，易发生淬火开裂，淬火边缘硬度在 56HRC 以上，而心部为 40HRC 左右。

② 添加导磁体感应淬火技术。图 3-21 所示为该类感应器，它是一种加导磁体的平面感应器，实际上是在 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1 \sim 1.5\text{mm}$ 的纯铜管壁上捆绑铁氧导磁体，利用其槽口效应将高频电流驱逐到感应器的工作表面上，从而提高加热的效率。该感应器加热效果好，硬化层分布平直、小头端面硬度分布均匀，其缺点为要在导磁体上加上冷却装置，制作、安装和密封均比较困难。

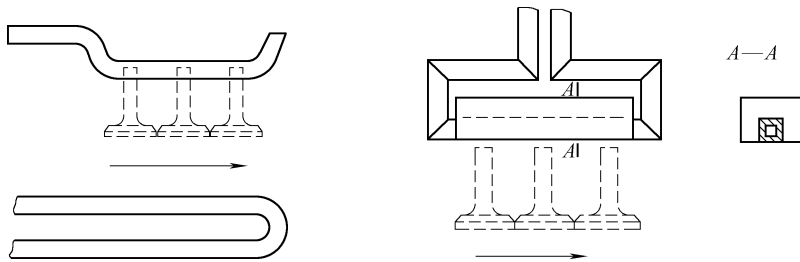


图 3-20 夹缝式感应器及气门位置

图 3-21 添加导磁体的杆端面淬火感应器

③ 串联回路式感应淬火技术。串联回路式端面淬火感应器如图 3-22 所示，前两个圈用于预热，最后的为加热圈。从图中可知每个回路有两个电流相同的导线，因此内部能够形成强大的合成磁场，而杆部端面处于磁场最强的位置，故此处加热迅速且均匀，气门杆部端面加热结束后空冷或浸油冷却。该加热方法应用比较广泛。

④ 自身驱流式感应淬火技术。自身驱流式感应器的结构和电流走向如图 3-23 所示，中间两根直导线上的高频电流的流向是相同的，其利用了同向电流相互排斥的邻近效应，将有效导线上通过的高频电流排斥到工作表面上，因此加热迅速，提高了生产率。图 3-24 所示为气门杆部高频感应淬火时，杆部与感应器接触打火击伤的缺陷图片。

四种气门杆部端面感应淬火技术的效果见表 3-7。

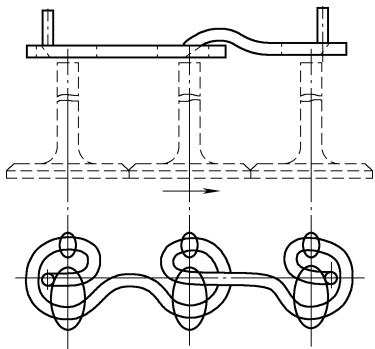


图 3-22 串联回路式端面淬火感应器

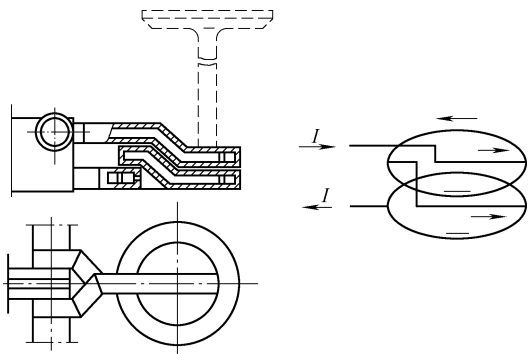


图 3-23 自身驱流式感应器结构和电流走向



图 3-24 气门杆部高频感应淬火电击伤

表 3-7 四种气门杆部端面感应淬火技术的效果

感应器的类型	感应淬火质量		质量状况	缺 点
	硬化层分布	硬 度 分 布		
夹缝式感应器	边缘深、中心浅	边缘高、中心低	淬火质量不稳定	制作简单
添加导磁体式感应器	平直	均匀	淬火质量稳定	导磁体的冷却困难
串联回路式感应器	平直	均匀	淬火质量稳定	制作困难
自身驱流式感应器	平直	均匀	淬火质量稳定	制作较困难

2) 进行气门锥面淬火是为了满足耐磨性的要求。气门阀口或锥面与气门底座要进行反复贴合，表面要具有高的硬度和良好的耐磨性，因此应对锥面进行高频感应淬火，来满足气门头部的技术要求以确保有高的使用寿命等，通常淬火后硬度在 50HRC 以上。为稳定组织、减小内应力，淬火后应立即进行低温回火处理。EW10 气门锥面高频感应淬火工艺规范见表 3-8。

表 3-8 EW10 气门锥面高频感应淬火工艺规范

设备型号	屏流 /A	栅极电流 /A	阳极 电压/kV	频率 /kHz	加热温度 /℃	加热时间/s	淬火冷却介质
GP-60	1.8 ± 0.2		12 ± 1	200 ~ 300			
GGC85-2B	4.0 ± 0.5	0.5 ± 0.2	7 ± 0.5	200 ~ 250	1060 ~ 1100	3 ~ 6	油温低于 80℃
GGC50-2B	2.0 ± 0.5		7 ± 0.5	200 ~ 250			

(4) 气门的表面处理 气门在发动机内工作时要求其能耐高温和抗燃烧气体腐蚀, 气门杆部进行高速的上下运动, 因此表面的质量状况直接影响到使用寿命。为了提高气门杆部的耐磨性和抗咬合性, 需对气门进行表面处理, 通常有氮碳共渗和镀铬两种方法。

1) 气门的氮碳共渗。发动机内进、排气门的工作条件十分苛刻, 且它们是密封燃烧室和控制发动机气体交换的精密零件。气门的高速运动和频繁开启, 除了产生机械疲劳外, 气门的盘部还会产生热疲劳。燃烧中的有害物质会对气门产生高温腐蚀和氧化腐蚀, 造成气门阀口(锥面)表面出现麻点和沟槽, 严重的会造成气缸漏气。

气门氮碳共渗的目的为提高气门杆部的硬度, 使其在干摩擦的条件下具有抗擦伤和抗咬合性能, 具有耐磨性和抗氧化性。

气门氮碳共渗的质量要求如下: 氮碳共渗层深度为 $0.010 \sim 0.060\text{mm}$; 表面硬度不小于 $600\text{HV}0.2$, 脆性小于 2 级, 渗氮层疏松, 渗氮物为 1~3 级; 杆部的变形量或膨胀量 $\leq 0.005\text{mm}$; 杆部、小头端面的表面粗糙度 Ra 值在 $0.5\mu\text{m}$ 以下; 外观为均匀一致的黑色, 无锈蚀、杆部花斑、表面划伤或磕碰伤、表面腐蚀和表面掉色等, 不得出现影响产品质量的外观缺陷。

氮碳共渗的工艺流程为: 浸泡→漂洗→喷淋→预热→氮碳共渗→发蓝处理→冷却→清洗→光饰或抛丸→煮油。气门液体氮碳共渗工艺曲线如图 3-25 所示。其中的三个关键工序为: 预热、氮碳共渗和发蓝处理。

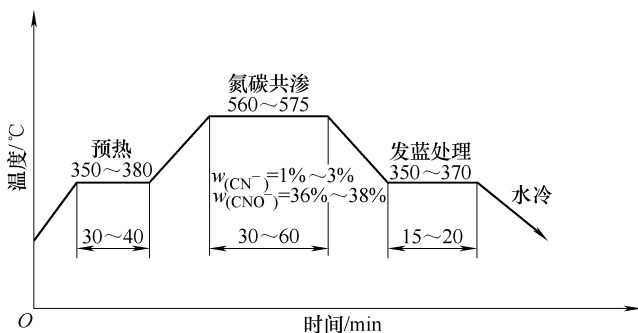


图 3-25 气门液体氮碳共渗工艺曲线

氮碳共渗后的气门表面清理方法有抛丸与光饰两种。常采用的吊钩式抛丸机的外形如图 3-26 所示。光饰(研磨)是将气门放入光饰(研磨)机中的使气门与磨料一起振动旋转, 常用磨料为棕钢玉(四棱柱), 也可用其他磨料, 加水可冲去磨掉的气门表面的氧化盐和黑灰等, 但清理效果差、容易生锈、磕碰伤较多等。目前国外常用的连续式自动研磨机如图 3-27 所示。

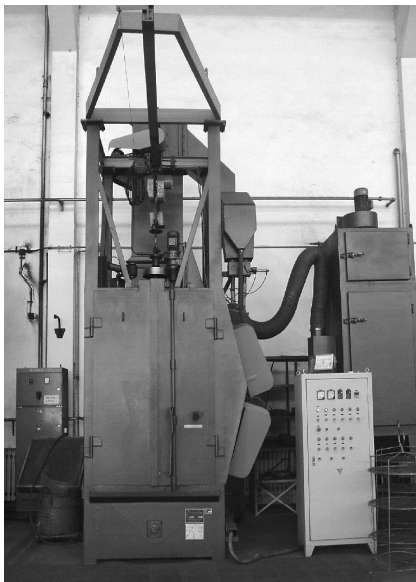


图 3-26 吊钩式抛丸机



图 3-27 连续式自动研磨机

采用国产 TJ-2 氮碳共渗基盐处理的气门的各项技术指标见表 3-9。

表 3-9 采用国产 TJ-2 氮碳共渗基盐处理的气门的各项技术指标

材 料	保温时间 /h	表面硬度 HV0.2	渗层厚度 /mm	杆部硬度 HRC 渗氮前/渗氮后	渗层 组织		直径变 形量/mm	直线度 /mm
					脆 性 1 级	疏 松 1 级		
40Cr	0.5	947	0.035	28/24	脆 性 1 级	疏 松 1 级	-0.004	0.002
45Cr9Si2	0.6	1045	0.025	35/35.4			+0.003	
40Cr10Si2Mo	0.6	1071	0.025	36/36.2			+0.004	
53Cr21Mn9Ni4N	0.7	1145	0.0175	38/37			+0.002	

由表中数据可知，液体氮碳共渗的渗层厚度、硬度均大于或高于气体氮碳共渗，变形量很小，渗层组织符合工艺要求。

2) 杆部镀铬。气门在高温的腐蚀性气体中，要承受气体反复冲刷的作用，镀铬后气门杆部具有摩擦因数小、润滑耐磨性好、表面硬度高、耐蚀性好等特点，硬度在 1000HV 以上，表面粗糙度 Ra 值在 0.4 以下。

杆部镀铬的技术要求为：铬层的厚度为 0.005 ~ 0.030mm，测量时既可用千分尺也可采用截面金相方法，表面硬度不小于 800HV0.2；铬层与基体的附着强度符合要求，其衡量标准是杆部在专用夹具上的弯曲角度符合要求，气门杆部无折断，要求变形区的硬铬镀层厚度为 8 ~ 10μm，用放大镜观察不允许有脆性剥落，但允

许有裂纹存在。

气门镀硬铬的工艺流程为：镀前磨削加工→表面超精加工（ $Ra0.4\mu\text{m}$ ）→精密尺寸镀铬→镀后抛光。其中镀铬工艺为清洗→镀铬（电流 $25 \sim 35\text{A/支}$ ，时间为 $3 \sim 5\text{min}$ ，加热温度为 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ ）→反镀（反向溶解铬层，时间为 0.7s ）→清洗。

在气门镀铬过程中，只对合金结构钢和马氏体型耐热钢气门的杆部进行镀铬，马氏体型耐热钢不进行阴极反镀，以避免杆部表面出现褐色及反应物影响铬层与基体的结合力。

气门镀铬时首先要对其表面进行认真清洗，既可使用有机溶剂也可化学脱脂，清洗彻底的标准是气门杆部无油污和粘附的杂物等，表面光洁；其次进行侵蚀处理，目的是活化金属基体；再次进行镀铬处理，获得理想的硬度和渗层；最后的工序是除氢，以降低杆部的脆性等。电离除油的工艺条件为：碳酸钠 $30 \sim 45\text{g/L}$ ，磷酸钠 $1.5 \sim 3\text{g/L}$ ，氢氧化钠 $7.5 \sim 10\text{g/L}$ ，温度 $90 \sim 95^\circ\text{C}$ ，电流密度 $3 \sim 5\text{A/dm}^2$ 。

镀前浸蚀处理是十分重要的工序，实际上是阴极腐蚀的过程。常见气门镀铬前的浸蚀处理工艺条件见表 3-10。根据实际情况可选择相应的配方。

表 3-10 常见气门镀铬前的浸蚀处理工艺条件

项 目	配 方 1	配 方 2	配 方 3
H_2SO_4	$6.5 \sim 7.5\text{g/L}$	质量分数 35%	10g/L
氟化物		质量分数 5%	
铬酐			$150 \sim 300\text{g/L}$
阴极	铝/铝合金		铝/铝合金
阳极		铅	
温度/ $^\circ\text{C}$	$25 \sim 30$		
电流密度/ (A/dm^2)	$10 \sim 40$		0.5

镀铬前的活化处理配方见表 3-11。

表 3-11 气门镀铬前的活化处理工艺条件

项 目	配 方 1	配 方 2
盐酸 ($d=1.17$)/(g/L)	$150 \sim 200$	
柠檬酸 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)/(g/L)		$200 \sim 250$
温度/ $^\circ\text{C}$	$15 \sim 25$	$15 \sim 25$
时间/min	$0.5 \sim 1$	$1 \sim 2$

气门电解镀铬（或称为镀硬铬）时采用普通的镀铬溶液、可溶性的氟化物与硫酸混合，同时加入催化剂。镀铬的常用工艺条件为：铬酐（ CrO_3 ） $250 \sim 280\text{g/L}$ ；

硫酸（ H_2SO_4 ）2.5 ~ 2.8g/L；电解液温度 50 ~ 55℃；电流密度 40 ~ 50A/dm²。

气门镀铬电解液的一般成分组成和工艺条件列于表 3-12 中供参考。

表 3-12 气门镀铬电解液的一般成分组成和工艺条件

项 目	低铬酐配方	高铬酐配方
铬酐浓度/(g/L)	156.3	273.4
硫酸浓度/(g/L)	1.08	2.6
CS ⁻ 添加剂浓度/(g/L)	1.8	
三价铬浓度/(g/L)	—	2.3
温度/℃	41 ~ 42	57 ~ 58
电流密度/(A/dm ²)	31 ~ 35	31 ~ 35

为了保证气门杆部镀层的质量符合要求，气门需预热到一定的温度，以防止基体金属受热膨胀而产生表皮剥落等，预热在镀铬槽中进行。为防止气门腐蚀，采用冲击电流，此时电流密度为 80 ~ 120A/dm²，时间为 1 ~ 3min。资料报道铬酐（ CrO_3 ）与硫酸 H_2SO_4 的比例（质量比）在 100:1 ~ 60:1 之间，温度为 58 ~ 60℃，催化剂的质量分数在 110% 以上，有利于得到理想的镀铬层。

气门镀硬铬处理后，应进行除氢处理，具体工艺为 200 ~ 250℃ × 2h，用来消除或降低因析氢而导致的镀层的氢脆，气门镀铬后表面镀层厚度为 10μm 左右，该镀层具有很高的硬度和好的耐磨性，汽车发动机上的气门要在高速运动的状态下工作，必须具备以上两特点。

5. 热处理工艺分析与操作要点

(1) 常规热处理

1) 气门在工作过程中，应在 600 ~ 800℃ 范围内具有较好的尺寸稳定性、良好的强度和硬度等，马氏体型耐热钢的淬火加热温度为 980 ~ 1050℃，温度低于 980℃ 碳化物溶解不充分，硬度低，力学性能差；高于 1050℃ 则溶解于奥氏体的碳化物过多，奥氏体晶粒粗大，其抗拉强度等降低，一般加热温度为 1030 ~ 1050℃，需要注意的是，对于高碳 90Cr18MoV 钢应采用 1060 ~ 1080℃ 的加热温度。

奥氏体型耐热钢的固溶处理分为半固溶处理和全固溶处理，随后进行时效处理。处理方法应依据气门的具体服役条件来确定，其热处理后的具体技术指标有晶粒度、硬度和析出量等，在固溶过程中应当确保晶粒均匀一致，在热处理工艺参数合理的前提下，出现晶粒度散差大、心部有未打开的“黑心”等情况时，则应考虑材料本身的问题。

2) 奥氏体型耐热钢时效后的析出物数量超标问题，多与固溶温度高或保温时间长、固溶冷却速度慢、时效温度高或时间长、钢中氮元素的含量不合理等有关。析出在晶界上的化合物主要有 M_{23}C_6 和 CrN，这将降低气门的韧性和疲劳强度，且耐蚀性差，直接影响到气门的使用寿命。因此应严格执行工艺参数，对于

6Cr21Mn10MoVNbN 而言,时效温度应低于 720°C ,否则析出物的体积分数将在 20% 以上。

3) 马氏体型耐热钢含有较多的合金元素,具有二次回火脆性,因此回火后应进行快速冷却处理。气门热处理后表面存在较多的氧化皮或残盐等,故需要进行喷丸或抛丸处理,随后进行气门的杆部和大头端面或盘锥面的校直,目前多采用先机械校直、后手工挑选(校直)的方式,个别气门厂家采用气门校直自动分选机,班产 6000 支,可以进行气门杆部、盘锥面或盘部端面的检测,



图 3-28 气门校直自动分选机

大大提高了生产率,降低了工人的劳动强度,图 3-28 所示为一台日本制造的气门校直自动分选机,具有故障率低、自动化程度高等特点,是代替手动检测的发展方向,具有十分广阔的市场前景。

(2) 氮碳共渗

1) 盐浴氮碳共渗炉应分阶段升温,通常在 520°C 保温 1h 后再将温度升高到 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$,并保温一定的时间。为防止内部的盐浴溶液膨胀冲破表面硬壳伤人,根据安全需要应在炉口扣上罩子。

2) 氧化盐的主要成分为氢氧化物,具有强烈的腐蚀性,操作者要穿戴齐全劳保用品,工件进入氧化炉后渗氮盐与氧化盐反应,有大量的泡沫出现,泡沫的多少完全取决于浸渍工件的表面积和氧化槽的温度,氧化工作温度为 $350 \sim 370^{\circ}\text{C}$ 。对于放置时间较长的氧化盐,在使用前应将炉温升到 400°C ,待表面停止反应 1h 后,才能处理工件。

3) 渗氮炉工作完毕后取出通气管,10min 后用捞渣勺从三个部位彻底捞渣,然后加入 TJ-2 基盐,到温后用莫尔法检测盐浴成分。根据检测结果添加 Z-1 再生盐时,应盖上铁板防止反应的气体逸出管道,每次加 $0.1 \sim 0.2\text{kg}$,待反应完后再加 $0.1 \sim 0.2\text{kg}$,直到规定的数量,这样可防止再生盐的挥发。一般 100kg 基盐加入 1kg 再生盐可将 CNO^- 质量分数提高 1% 左右。

4) 渗氮炉每班捞渣,渣的多少不仅取决于工件的数量、钢材和表面积的大小以及夹具的形状和大小,而且与细小的加工铁屑或磨料、捆扎用铁丝生成氧化铁或微细的铁屑以及再次使用的设备、夹具剥落的渗氮剂层与工件一起被带入到盐浴中有关,这些物质以细小悬浮物的形式沉积在工件上或沉积在渗氮罐的罐壁

或底部，必须从盐浴中去除，此时盐浴的污染程度决定于炉内沉积物的多少，杂物的排除可用人工方法，也可借助于盐过滤系统，以确保渗氮效果，并补充新氮碳共渗基盐。

5) 对于氮碳共渗气门而言，校直后和机械加工后的去应力退火温度应控制在 590 ~ 620℃ 范围内，事实证明该温度可消除 85% 以上的内应力，可确保氮碳共渗后气门杆部直线度在 0.005mm 以内，这一点在氮碳共渗后的气门抛丸工序上有显著的表现。

(3) 杆部镀铬

1) 气门杆部镀铬前的表面粗糙度对表面状态的影响较大，表面粗糙度值大的表面存在凹凸不平的区域，此处会存积水和腐蚀性物质等，在高温腐蚀性气体的作用下，对凹坑的侵蚀将加剧表面的腐蚀；铬在杆部表面沉积的多少与原始表面状况有直接的关系，镀铬后表面粗糙度值增大；镀铬后对杆部用纸质或布质砂轮进行少量的抛光，目的是去掉高点铬层，进一步提高气门杆部的表面质量，使其具备要求的性能。由此看来表面粗糙度高会对气门表面耐磨性和耐蚀性产生不良影响，考虑到气门的技术要求和经济性，通常杆部表面粗糙度 R_a 值控制在 $0.4\mu\text{m}$ 以下。

2) 在镀硬铬时加入专用的催化剂来提高电流密度、沉积速度，同时也相应提高了镀铬层的物理性能。气门制造厂采用成熟的 HEEF-25 硬镀工艺，用该工艺处理后镀层裂纹细而密，达到 400 ~ 1000 条/cm，微裂纹能够松弛镀层中的应力，产生的高密度微裂纹比较细短，因此造成腐蚀电流的分散，使腐蚀的速度大大降低，起到很好的保护作用。影响微裂纹的因素有电流密度、温度、铬酐浓度、硫酸的含量和铁杂质的含量等，其中前两项是关键参数，应加以控制。

3) 镀铬后气门杆部开始形成的微裂纹被沉积的铬层覆盖，实践证明耐蚀性随铬层厚度的增加而增强。杆部的抛光至关重要，不抛光的耐蚀性差（在中性盐雾中 48h，2 ~ 5 级），而抛光后表面粗糙度明显改善，性能优良。采用氧化铬抛光粉，封住或减小镀层中的孔隙或裂纹，因此耐蚀性增强，采用不同类型的抛光轮（如砂轮、布砂轮或纸砂轮等）对气门杆部抛光，既可保证渗层厚度均匀，又提高了表面质量。

(4) 气门的质量检验 气门的热处理质量检验项目见表 3-13。

表 3-13 气门的热处理质量检验项目

检 验 项 目		检 验 方 法	检 验 要 求
气门显微组织的方向		宏观	纤维组织符合气门外形的流线方向
表面质量		观察	无裂纹、锈蚀、划伤和磕碰伤
硬度	气门整体硬度	洛氏硬度计	30 ~ 37HRC
	杆端面硬度		≥50HRC

(续)

检 验 项 目		检 验 方 法	检 验 要 求
基体金相组织	合金结构钢	金相显微镜	回火索氏体，游离态铁素体的体积分数<5%，晶粒度≥6级
	马氏体型耐热钢		回火索氏体，不允许有游离态铁素体，无连续网状碳化物，晶粒度≥6级
	奥氏体型耐热钢		奥氏体，晶粒度≥3级，析出物符合图样要求
渗氮	渗氮层	金相显微镜	0.01~0.06mm
	疏松		1~3级
	渗氮物的级别		1~3级
镀硬铬	镀铬层	金相显微镜	0.005~0.030mm
	疏松		1~3级
	微裂纹		400~1000条/cm
堆焊层		金相显微镜	与基体金属结合牢固，无开裂等
杆部淬火硬化层		金相显微镜	按JB/T 6012.2—2008或图样执行
无损检测		磁粉无损检测	无裂纹等
		超声波无损检测	用于焊接气门焊缝的检查

6. 进、排气门的热处理，液体氮碳共渗以及杆部镀铬缺陷分析与预防、补救措施

1) 常见进、排气门的热处理缺陷原因分析与预防、补救措施见表3-14。关于气门的裂纹多采用超声波探伤，可对摩擦焊中出现的裂纹、未焊透部分、非金属夹杂物以及堆焊层质量进行全面检查，现在涡流检测也用于气门的探伤处理，其应用范围更广。

表 3-14 常见进、排气门的热处理缺陷原因分析与预防、补救措施

缺 陷 名 称	产 生 原 因	预 防、补 救 措 施
盘部裂纹	① 锻造加热温度过高 ② 停锻温度太低	① 严格控制加热和停锻温度 ② 热处理前进行磁粉无损检测
奥氏体型耐热钢 晶粒粗大	① 锻造温度高或成形加热时间长 ② 固溶温度高或时间长	① 控制锻造的加热温度和时间 ② 测温准确，按规定抽检晶粒度和安装时间继电器
奥氏体型耐热钢 层状析出物超标	① 固溶和时效温度高或时间长 ② 固溶冷却速度慢或水温高 ③ 奥氏体型耐热钢含氮量不符合技术要求	① 严格执行工艺文件中的工艺参数，符合技术要求 ② 快速入水，使用带散热系统循环质量分数为5%的盐水 ③ 检查钢材的成分，析出超标产品重新固溶处理

(续)

缺陷名称	产生原因	预防、补救措施
马氏体型耐热钢晶粒粗大	淬火加热温度高或时间长	严格执行工艺文件规定的温度和时间，首炉气门检查晶粒度
马氏体型耐热钢盘锥面堆焊合金处开裂或剥落	① 合金与基体的融合差，或二者的膨胀系数不同 ② 回火冷却时错误地采用了水冷方式	① 选择合适的合金焊条或焊粉 ② 回火后选择空冷方法

2) 常见气门液体氮碳共渗缺陷原因分析与预防、补救措施见表3-15。

表 3-15 常见气门液体氮碳共渗缺陷原因分析与预防、补救措施

缺陷名称	产生原因	预防、补救措施
化合物层薄或无化合物层	① CNO ⁻ 含量低或过高，活性低 ② 温度低或时间短 ③ 盐浴中沉淀渣过多	① 加再生盐还原或换盐 ② 调整温度和时间 ③ 彻底捞渣
CNO ⁻ 含量下降太快	① 温度过高或超温 ② 未捞渣或捞渣不彻底 ③ 通气量过大，反应过于激烈	① 添加报警装置 ② 停炉捞渣或抽出废盐 ③ 调节流量计使流量符合要求
CN ⁻ 含量太高	① 未通气或通气量小 ② 渗氮盐老化	① 增大通气量 ② 整锅换新盐
CN ⁻ 含量太低	① 新渗氮盐未陈化处理 ② 通气量大 ③ 生产过程中添加基盐过多	① 放入通气管在600~620℃空载运行2~3h ② 按要求通气，以周围出现气泡为宜 ③ 进行通气处理
表面疏松严重、起皮或表面粗糙度高（腐蚀）	① CNO ⁻ 含量超出工艺要求 ② 新盐未陈化、CN ⁻ 含量太低 ③ 温度超过575℃ ④ 渗氮时间过长 ⑤ 漂洗时间长 ⑥ 沉渣或极细的颗粒浮渣太多 ⑦ 渗氮后未及时氧化 ⑧ 加入再生盐后未通气反应 ⑨ 预热时间长，工件表面有轻微氧化 ⑩ 把再生盐误当做基盐加入炉内	① 空载运行使CNO ⁻ 质量分数降到≤38% ② 620℃运行2~3h再降至工艺温度 ③ 在工艺范围内渗氮 ④ 按要求执行 ⑤ 漂洗1min ⑥ 挖渣和滤掉漂浮渣，陈化处理，使盐浴成分符合要求 ⑦ 工件渗氮后表面无盐时立即进行发蓝处理 ⑧ 按要求放入通气管恢复盐的活性 ⑨ 严格执行工艺要求 ⑩ 将炉温升到600℃通气熬盐2h后降到570℃

(续)

缺陷名称	产生原因	预防、补救措施
调整成分时有氨臭味	有 NH ₃ 、CO ₂ 、H ₂ O 的逸出	开启抽风装置
炉内有过量废渣	① 工、夹具未抛丸处理 ② 油污或铁屑、金属屑带入炉内 ③ 渗氮盐的杂质含量超标	① 工、夹具每隔三班抛丸一次 ② 清洗干净油污、去掉铁屑,可 24h 对工艺装备抛丸一次,严禁生锈的钢铁零件放入炉内 ③ 严格检查,确保质量合格
有花斑,颜色不一致或底面、圆弧发黄	① 未除净工件上的锈迹 ② 工件有叠压 ③ 盐浴中渣多或老化 ④ 工件有划伤 ⑤ 工件表面的切削液或乳化液未洗净 ⑥ 氧化盐失去作用 ⑦ 预热温度低或渗氮时间短 ⑧ 盐浴温度过低 ⑨ 通气管位置过低,靠近炉底部,搅动盐渣 ⑩ 气门在光饰机中未及时捞出,热水槽长期不换水,内部氧化盐过多粘附在气门上	① 用稀盐酸、喷砂或砂纸除去 ② 工件之间要有一定的间隙,不允许叠压,可采用双层工艺装备,装炉量可提高 80% ③ 停炉彻底捞渣,添加基盐 ④ 精心操作,轻拿轻放,严格执行工艺,不允许有气门堆集现象 ⑤ 清洗剂失效,定期更换清洗剂,用毛刷擦净气门表面上粘附的物质 ⑥ 添加新氧化盐或换盐 ⑦ 提高预热温度或延长渗氮时间 ⑧ 采用工艺温度的中上限 ⑨ 停炉后重新起炉时,将炉温定在 520℃,彻底捞渣 ⑩ 光饰结束后立即取出气门,定期更换热水槽中的水,并冲刷干净

3) 在电镀过程中,由于操作不当或成分、温度等发生变化,将会对气门表面的镀铬层产生一定的危害,直接影响产品的外观和内在质量,因此要严格执行镀铬工艺。常见气门杆部镀铬缺陷原因分析及预防、补救措施见表 3-16。

表 3-16 常见气门杆部镀铬缺陷原因分析及预防、补救措施

缺陷名称	产生原因	预防、补救措施
光亮度差	① 镀液温度低 ② 三价铬含量高 ③ 硫酸根浓度低 ④ 镀液中金属杂质含量高	① 提高温度 ② 分析调整三价铬的含量 ③ 添加硫酸,提高其浓度 ④ 用离子交换树脂处理

(续)

缺陷名称	产生原因	预防、补救措施
覆盖性差	① 镀铬液的温度高 ② 硫酸根浓度高 ③ 三价铬含量高 ④ 镀液中金属杂质含量高 ⑤ 氯离子的含量高 ⑥ 镍层表面钝化	① 降低镀铬液的温度 ② 加入碳酸钡 ③ 电解处理 ④ 用离子交换树脂处理 ⑤ 电解处理或加入碳酸盐 ⑥ 镀镍后及时回火
镀铬层与镍层一起脱落	① 镀镍前处理不彻底 ② 镀镍层内应力大 ③ 镀铬时电流密度大 ④ 电镀过程中断电 ⑤ 零件在槽中预热时间短 ⑥ 硫酸根的含量高 ⑦ 电流或槽内温度变化大	① 加强镀前的处理 ② 调整镀镍的电流 ③ 降低电流密度 ④ 确保电力供应正常 ⑤ 预热时间应充足 ⑥ 加入碳酸钡中和硫酸 ⑦ 合理控制, 符合技术要求
边缘易烧焦	① 电流密度过大 ② 镀铬液的温度低 ③ 硫酸根浓度高	① 降低电流密度 ② 提高镀铬液的温度 ③ 用碳酸钡处理多余的硫酸
出现乳白色镀层	① 电流密度低 ② 镀铬液温度低	① 提高电流密度 ② 降低镀铬液的温度
镀层表面有棕色斑纹	① 硫酸根浓度低 ② 三价铬含量不足	① 提高硫酸根浓度 ② 小阳极、大阴极进行电解处理
铬层有彩红色	① 硫酸根浓度低 ② 镀铬时间长 ③ 气门入槽温度低 ④ 挂具接触不良	① 补加硫酸铜 ② 降低镀铬液浓度 ③ 提高槽内的温度 ④ 检查修正接触点
铬层有裂纹	① 硫酸根浓度高 ② 含镍的淬透性大 ③ 镀铬层过厚 ④ 镀铬液的温度过低	① 加入碳酸钡 ② 补加糖精 ③ 控制镀铬的厚度 ④ 提高镀铬液的温度
杆部发花或呈灰色	① 电镀前处理不良 ② 氯离子的含量过高 ③ 镀镍液中糖精含量过高 ④ 镀铬液的温度低	① 加强镀前的处理 ② 加碳酸银处理或电解处理 ③ 加丁炔乙醇进行活性处理 ④ 提高镀铬液的温度

7. 气门的热处理缺陷对产品安全性的影响

气门的热处理应包括两个方面：其一为整体热处理，即对奥氏体型耐热钢气门

或大头进行固溶 + 时效处理或直接进行时效处理，对马氏体型耐热钢气门进行调质处理，以获得要求的硬度和组织，确保气门的内在质量；其二为为提高气门杆部端面耐磨性而进行的高频感应淬火。在具体操作过程中操作不当、工艺本身的缺陷、设备故障、工艺装备不完善等均会造成质量缺陷，严重的将危及汽车及人身安全，因此绝不可掉以轻心，应认识缺陷产生的原因，找出科学合理的解决措施。气门的热处理检查项目一般有晶粒度、硬度和显微组织，硬度是质量比较直接的反映，易于检查，而其他两项需要通过显微镜观察，因此气门的热处理缺陷检查必须查看金相组织，只有这样才能确保气门的热处理质量。气门的热处理缺陷对产品安全性的影响见表 3-17。

表 3-17 气门的热处理缺陷对产品安全性的影响

产品缺陷名称	产生原因	后 果
气门奥氏体晶粒度超差即晶粒太细或太粗	① 加热温度过高或过低 ② 原材料晶粒有混晶现象	① 高温蠕变性能差，难以发挥材料的优良性能 ② 塑性差、易断裂
气门杆部硬度低或堆焊层强度低	高频感应淬火温度低或焊粉或焊条等牌号有误	气门杆部耐磨性差，易于产生塑性变形，引起断裂
气门杆端面淬火区在锁夹槽内或超过锁夹槽	加热时间长从而延伸过槽	① 产生软带区 ② 尖角等产生内应力集中 ③ 发生断裂，甚至将活塞损坏
多槽型锁夹槽淬火时淬火区不过槽	加热时间短或感应器高度不够	① 出现软带区，发生锁夹槽处断裂 ② 造成槽部不耐磨
密封锥面硬度低	使用的材料牌号有误或锥面氮碳共渗层薄	锥面的耐磨性差，使用寿命短
气门杆部端面硬度低	高频感应淬火时温度低或时间短	① 不耐磨，使用寿命短 ② 气门杆部端面磨损后，气门间隙大，气门的杆部冲击增大，噪声加剧

3.2.2 气门导管

气门导管一般由灰铸铁、球墨铸铁或铁基粉末冶金材料制造，导管的内、外圆柱面具有较高的精度和表面质量，镶入气缸盖或气缸体的导管孔中。气门杆与气门导管之间应留有 0.05 ~ 0.12mm 的间隙，见表 3-18，以确保气门杆能在导管内自由运动。事实上气门与气门导管的间隙与材料、长度、弯曲程度、磨损等有关，应根据情况确定。

表 3-18 气门杆与气门导管之间的间隙值

气门杆部直径/mm	进气门杆与气门导管间隙/ μm	排气门杆与气门导管间隙/ μm
6 ~ 7	10 ~ 40	25 ~ 55
8 ~ 9	20 ~ 50	35 ~ 65
10 ~ 12	40 ~ 70	55 ~ 85

3.2.3 气门座（镶块式铸造气门座）

1. 气门座的工作条件与技术要求

气门座是气门头部的支承面，它与气门头配合对气缸起到密封的作用，为加速配合处使用初期的磨合，提高其密封性，气门座锥角应比气门锥角大 $0.5^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 。由于气门座在高温下磨损严重，因此采用合金钢等耐磨性好、质量轻的材料制成，要求其锥面的硬度高、尺寸稳定性好，起到密封气门和冷却气门头部的作用。气门座失效的主要形式为烧蚀和磨损。

2. 材料的选用

根据气门座的工作环境，不少发动机的气门座使用球墨铸铁、合金铸铁或耐热合金钢单独制造，常使用的材料介绍如下。

(1) 球墨铸铁 QZ1、QZ2、QZ3 材料

- 1) 石墨的形态和分布。1 ~ 4 级为合格，分散度越大分布越均匀。
- 2) 合金碳化物的分布和数量。要求合金碳化物呈断续网孔状或较小的块状，且分散分布，块体大小适中，不允许有严重的枝晶和偏析，合金碳化物的质量分数为 7% ~ 20%，1 ~ 3 级合格。
- 3) 合金碳化物的形态。要求其呈小条块状、中等块状，不允许呈大块状，1 ~ 2 级合格。

4) 基本组织为细的针状珠光体组织。

(2) 球墨铸铁 QZ4 材料

- 1) 石墨的形态和分布。要求石墨为团絮状或点状，分布均匀，1 ~ 3 级合格。
- 2) 合金碳化物的分布和数量。要求合金碳化物呈细小的块状分散分布，不允许有严重的方向性分布和偏析，合金碳化物的质量分数为 20% ~ 40%，1 ~ 3 级合格。
- 3) 合金碳化物的形态。要求合金碳化物为小块或中等块状，不允许有大块的碳化物，1 ~ 2 级合格。

4) 基体组织为回火索氏体。

(3) 球墨铸铁 QZ5、QZ6 材料 球墨铸铁 QZ5、QZ6 为高铬铸铁材料

- 1) 合金碳化物的分布和数量。要求合金碳化物呈断续网孔状分散分布，不允

许呈严重的方向性或板条状分布，合金碳化物的质量分数为 10 ~ 40%，1 ~ 5 级合格。

2) 合金碳化物呈细小块状、中等块状，不允许有较大块的碳化物，1 ~ 3 级合格。

3) 基体组织为回火索氏体，不允许存在粒状珠光体。

上述六种材料的化学成分和硬度见表 3-19。

表 3-19 内燃机气门座用材料的化学成分和硬度

材料 代号	化学成分（质量分数，%）										硬度 (HRC)
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	
QZ1	3.0 ~ 3.5	1.8 ~ 2.2	0.6 ~ 1.0	≤0.12	≤0.12	0.7 ~ 1.0	0.3 ~ 0.6	0.3 ~ 0.6	—	—	32 ~ 38
QZ2		2.0 ~ 2.4				0.8 ~ 1.2	0.6 ~ 1.0				
QZ3		2.0 ~ 2.5	0.5 ~ 0.8	≤0.10	≤0.10	—	0.6 ~ 1.2	0.8 ~ 1.2	0.6 ~ 1.2	0.2 ~ 0.4	30 ~ 40
QZ4		2.8 ~ 3.1					1.6 ~ 2.4	1.8 ~ 2.5	—	—	34 ~ 42
QZ5		1.5 ~ 2.0					13.5 ~ 15	0.35 ~ 0.5			36 ~ 45
QZ6		1.3 ~ 1.8					18 ~ 22	—	1.0 ~ 1.5		36 ~ 42

外观质量要求密封锥面不得有裂纹、疏松、气孔和夹杂等缺陷。

内燃机排气门座使用新材料 150Cr18Ni7Mo3 铸造合金，该合金铸态的硬度为 30 ~ 35HRC，具有良好的切削加工性能，在 650℃ 保持 6h，硬度上升至 40HRC 以上，具有良好的耐磨性；在 550 ~ 650℃ 温度范围内，具有良好的抗氧化铅腐蚀能力。

3. 白口铸铁 15Cr3Mo 进气门座的热处理工艺

白口铸铁 15Cr3Mo 进气门座（CA141 汽车）要求热处理后硬度为 27 ~ 37HRC，金相组织为回火索氏体 + 针状或粒状碳化物，热处理的目的是改善耐磨性与获得优良的综合力学性能。其热处理工艺曲线如图 3-29 所示。

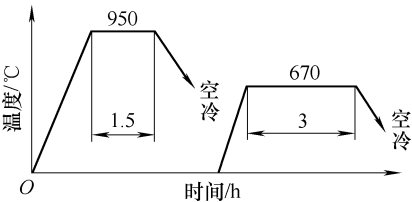


图 3-29 进气门座（CA141 汽车）热处理工艺曲线

4. 热处理工艺分析与操作要点

- 1) 操作者应严格执行工艺要求, 确保仪表与设备正常工作。
- 2) 由于进气门座呈薄片圆环状, 故气门座应平整加热与冷却。

3.2.4 气门弹簧

1. 工作条件和技术要求

汽车发动机使用的气门弹簧是控制封闭燃烧室内废气排出的重要部件, 其工作温度为 300°C 左右, 在工作过程中弹簧要受到 $1500 \sim 3000$ 次/min 的压缩作用, 因此既受到高频率、高应力非对称交变应力的作用, 又要承受相当大的振动和冲击作用, 同时还要承受弯曲和扭转应力的作用, 加上排出废气的腐蚀等, 其工作条件差。气门弹簧失效的主要形式为弹力不足、疲劳断裂和应力松弛等, 其断口常在 $2 \sim 3$ 圈位置, 断口与轴线呈 45° 角, 断裂均发生在弹簧内表面处, 弹性不足会造成漏气而影响发动机的正常工作, 其性能决定于材料成分和热处理工艺。如果弹簧断裂后落入气缸内, 轻则会降低发动机的效率、造成耗油量的增加等, 重则会引发车毁人亡的重大事故。考虑到弹簧的最大应力往往发生在表面, 故必须防止其表面脱碳, 同时要对表面进行喷丸处理, 以提高弹簧的疲劳强度和使用寿命等。

在弹簧的失效形式中, 脆性断裂、疲劳断裂和应力腐蚀以及腐蚀疲劳等是主要的方式, 疲劳断裂为脆性断裂的 $80\% \sim 90\%$, 其中由内侧表面的夹杂物引起的应力集中而导致的断裂占有一定的比例。正确分析弹簧的失效原因, 有助于在弹簧的材料、几何形状、尺寸精度、热处理工艺以及表面质量等几个方面找到影响产品质量的根源。

2. 材料的选用

发动机转速的提高对弹簧的弹性极限、疲劳强度提出了更高的要求, 根据工作特点可知选用的材料既要在 300°C 左右仍然有良好的弹性极限和疲劳强度, 即具有一定的高温力学性能, 又要具有高的冲击韧度。

常用的钢材为碳素钢钢丝 65Mn、70 等, 合金弹簧钢丝 50CrV 等, 经淬火和回火后, 硬度为 $44 \sim 50\text{HRC}$, 硬度散差不大于 5HRC , 如经过等温淬火则硬度为 $46 \sim 54\text{HRC}$, 弹性和强度等完全满足气门弹簧的工作需要。50CrVA 钢的含碳量稍低于 60Si2Mn 钢, 具有良好的冲击韧性和塑性, 该钢中铬元素在加热时部分溶于铁素体中, 在中温回火后硬度和强度得到提高, 同时耐回火性好, 钒与碳结合成 V_4C_3 十分稳定, 以高度弥散的质点分布于奥氏体中, 阻止了晶粒的长大, 淬火后获得细小的马氏体组织。由于该钢的耐回火性好, 即使在 500°C 左右回火仍具有高的屈服强度和抗拉强度, 对缺口的敏感性小, 可抵抗冲击载荷的作用, 加上加热时不易过热和脱碳, 成为气门弹簧的首选材料。

3. 气门弹簧的机械加工工艺流程

气门弹簧的机械加工工艺流程如下：备料→绕簧→去应力退火→磨两端面→淬火→中温回火→表面喷丸→压成形→校正→第二次去应力退火→检查→发蓝→包装入库。

1) 绕簧工序采用直径在 12mm 以下的冷绕成形工艺，有专用的工艺装备和设备以确保内径符合要求。

2) 去应力退火的目的是消除冷绕时因塑性变形而产生的内应力，为防止弯曲变形应将弹簧垂直放置于炉内。一般去应力退火的热处理工艺为 400 ~ 500℃ 保温 10 ~ 20min 后空冷或油冷，为最终的热处理做好准备。

4. 热处理工艺

气门弹簧的技术要求为硬度 40 ~ 50HRC，金相组织为回火托氏体，无氧化脱碳，变形量符合要求。

1) 气门弹簧的加热是在盐浴炉或可控气氛炉中进行的，以防其表面发生氧化和脱碳现象，50CrVA 钢的加热温度为 840 ~ 880℃，通常规定直径大于 6mm 的选用下限温度，直径小的用上限温度加热，盐浴加热保温系数为 1.2 ~ 2min/mm，需要注意盐浴的脱氧捞渣。没有盐浴炉或可控气氛炉的厂家也可在箱式电阻炉中加热，采取通保护气体或浸涂硼酸酒精溶液的方法，也可达到防止或减少氧化脱碳的目的。

2) 淬火冷却介质为 10 号或 20 号机械油，油温在 20 ~ 60℃ 之间，为防止变形要将弹簧水平放入油中并水平缓慢移动，也可将其放入专用淬火夹具中，压好后水平放入油中，这样变形较小，冷却到 100 ~ 150℃ 时提出立即进行回火。

3) 为防止弹簧开裂，淬火后应尽快回火（4h 内），为确保回火的效果，一般在硝盐炉中回火（ KNO_3 和 NaNO_2 的质量分数均为 50%），加热温度为 370 ~ 420℃，保温时间为 30 ~ 60min，为保证内外径尺寸、弹簧的高度和垂直度等，少数厂家采用套筒回火，回火后的基体组织为回火托氏体，硬度为 45 ~ 52HRC。50CrVA 钢制气门弹簧的热

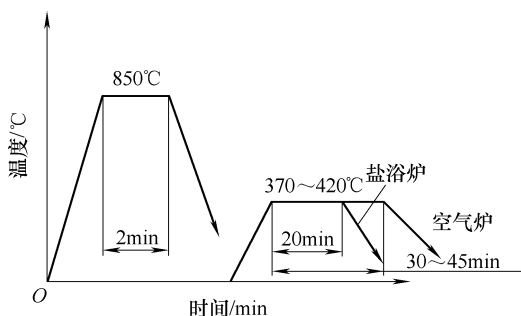


图 3-30 50CrVA 钢制气门弹簧的热处理工艺规范

处理工艺规范如图 3-30 所示，回火所用套筒的示意图如图 3-31 所示。

弹簧热处理后的金相组织为回火托氏体 + 少量的铁素体，不允许有马氏体组织存在，等温淬火的组织为下贝氏体 + 回火马氏体。

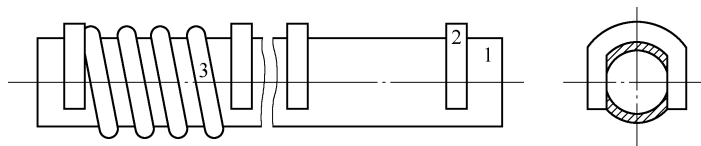


图 3-31 回火所用套筒的示意图

1—套筒 2—楔块 3—弹簧

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 对已呈盘卷状态的弹簧回火时,不允许引起表面的损伤和变形,采用箱式炉、推杆炉、步进式网带炉等,并使用专用夹具等,为防止脱碳用吸热式气氛作为保护性气体,并进行炉内气氛的循环,采用连续式或周期式热处理设备时一定要注意弹簧的回火要充分。

2) 回火后要对尺寸不符合要求的弹簧进行校正,这样的弹簧在局部会产生内应力,在 $360 \sim 370^{\circ}\text{C}$ 温度下保温 $5 \sim 15\text{min}$ 去除应力后,对性能没有任何影响。

3) 采用改进的 50CrVA 弹簧的热处理工艺,可提高疲劳寿命。资料介绍采用 B-M 等温淬火工艺,即 $900^{\circ}\text{C} \times 5\text{min} + 300 \sim 320^{\circ}\text{C} \times 5\text{min}$ 油冷, $250 \sim 300^{\circ}\text{C} \times 30 \sim 60\text{min}$ 回火,处理后材料的抗拉强度为 $1816 \sim 1896\text{MPa}$,断面收缩率为 $46.7\% \sim 49.1\%$ 。经传统热处理工艺处理后弹簧的疲劳寿命为 2.24×10^6 次,现在达到 1×10^7 次,原因在于等温淬火形成了下贝氏体 + 马氏体组织,使马氏体晶粒得到细化,因此延长了弹簧的使用寿命,另外下贝氏体具有较高的塑性和韧性,同时产生显微裂纹的倾向减小,因此提高了疲劳寿命。

6. 提高气门弹簧寿命的措施

由于对该类弹簧疲劳强度的要求较高,加上又在较高的温度下工作,因此提高其使用寿命是十分重要的现实问题,目前比较成熟的方法有以下两种。

(1) 进行弹簧的松弛处理 为防止气门弹簧在长期工作的过程中因微量的永久塑性变形而导致力学性能的变化影响其使用寿命,应进行弹簧的松弛处理。其方法为先对弹簧施加一定的载荷,使其变形量超过正常工作时的形变量,在比正常工作温度高 20°C 的情况下保温 $8 \sim 24\text{h}$,这种方法可避免弹簧产生微量的塑性变形,延长其使用寿命。

(2) 对弹簧进行喷丸或抛丸处理 划痕、折叠、氧化皮等往往成为工作应力集中的地方和疲劳裂纹源,进行喷丸处理可改变表面的质量状况,细小的铸铁丸或钢丸以很高的速度 (70m/s 左右) 喷射在弹簧的表面上,不仅可消除缺陷,提高产品质量和基体的强度,而且可使弹簧表面处于压应力状态,极大提高了疲劳强度和使用寿命,它是目前提高弹簧寿命的一个常用方法。喷丸处理对不同表面状态的影响见表 3-20。

表 3-20 喷丸处理对不同表面状态的影响

材 料	表 面 状 态	疲劳强度 σ_{-1} /MPa		伸长率 (%)
		未喷丸	喷丸处理	
55Si2Mn ^①	热轧, 脱碳 0.15mm	320	590	84
55Si2Mn	热轧, 脱碳 0.1 ~ 0.15mm	484	921	90.3
55Si2Mn	表面珩磨	876	—	—
弹簧钢丝	脱碳 0.05mm	300 ~ 374	560	87 ~ 50

① GB/T 1222—2007 中已取消了此牌号。

对气门弹簧进行氮碳共渗处理, 可明显提高疲劳强度, 从表 3-21 中可看出它是一种不错的强化处理工艺。

表 3-21 50CrVA 气门弹簧低温氮碳共渗热处理与普通热处理疲劳强度的对比

热处理工艺	断裂应变周次	断裂后残余 变形量/mm	室内耐大气的腐蚀试验
860℃ 油淬, 420℃ × 1h 回火	1.78×10^4	21.4	发蓝处理后未上油, 14 天后锈蚀
860℃ 油淬, 480℃ × 3h 氮碳共渗	$\geq 100 \times 10^4$	0.2	850 天未发生锈蚀
860℃ 油淬, 510℃ × 3h 氮碳共渗	$\geq 100 \times 10^4$	0.6	850 天未发生锈蚀

7. 气门弹簧的常见热处理缺陷分析与对策

气门弹簧的热处理包括淬火、回火与抛丸处理, 对各工序容易产生缺陷的原因与对策进行归纳与整理, 在生产中可进行缺陷的有效预防, 以确保产品质量符合技术要求。气门弹簧的常见热处理缺陷分析和对策见表 3-22。

表 3-22 气门弹簧的常见热处理缺陷分析和对策

缺 陷 类 型	对弹簧性能的影响	产生的原因	防止及补救措施
表面脱碳	疲劳强度低	① 在空气中停留时间长 ② 炉子密封不彻底 ③ 加热温度高或时间长	① 控制加热炉内的气氛 ② 采用快速加热工艺 ③ 严格执行工艺规定, 并加强金相组织的检验
淬火后 硬度不足 或不均	产生强化变形, 降低使用寿命	① 有非马氏体存在 ② 心部有铁素体 ③ 淬火温度低或加热不均 ④ 冷却能力不足	① 选用淬透性好的材料 ② 提高淬火冷却介质的冷却能力 ③ 在 A_{r3} 以上温度淬火 ④ 提高淬火的加热温度 ⑤ 选用冷却性能好的淬火冷却介质 ⑥ 淬火后进行金相检验

(续)

缺陷类型	对弹簧性能的影响	产生的原因	防止及补救措施
过热	晶粒粗大, 脆性增大	① 加热温度过高 ② 热成形温度高	① 正确控制加热温度 ② 降低热成形温度 ③ 校对控温仪表
开裂	脆性增大, 严重降低使用寿命	① 加热温度过高或冷却速度过快、淬火的油温过高 ② 表面脱碳, 或原材料存在组织缺陷 ③ 回火不及时 ④ 淬火冷却速度快	① 严格控制加热温度, 在淬火冷却介质中冷却到 250 ~ 300℃ 提出空冷, 加冷却或循环装置 ② 严格执行原材料规定, 使用合格的钢材 ③ 及时回火 ④ 选用合理的淬火冷却介质
淬火变形	降低弹性	① 弹簧倾斜 ② 弯曲过大 ③ 节距不均	① 保证弹簧垂直加热和回火 ② 穿入心棒避免弯曲 ③ 改进工艺或装备

3.3 气门传动组零件的热处理

3.3.1 凸轮轴

1. 工作条件与技术要求

凸轮轴是发动机配气系统中的重要部件, 凸轮轴的旋转是依靠曲轴带动的, 用来保证各个气缸内进、排气门按一定的时间正常开启和关闭, 保证发动机充分换气, 使进、排气门持久地确保燃烧室的密封性, 确保发动机具有良好的可持续性和动力性。另外凸轮轴还要用来驱动燃烧系统等零件。在低应力作用下凸轮轴与气门阀杆、挺杆构成摩擦副, 在工作过程中承受连杆周期性挤压应力的作用, 同时还受到一定的弯曲和转矩的作用, 此外又要承受与挺杆相接触产生的滑动及滚动摩擦的作用以及周期性的冲击载荷。图 3-32 所示为凸轮轴与凸轮形状。凸轮轴的主要损坏形式为接触疲劳破坏(粘着磨损, 即擦伤)、凸轮磨损、表面压应力反复作用造成麻点和块状剥落等。因此要求凸轮轴必须具有以下特性: 良好的接触疲劳强度和抗擦伤性; 高硬度和较好的耐磨性; 接触表面具有足够的强度和刚性, 可承受气门开启的周期性冲击载荷的作用。

2. 材料的选用

凸轮轴的材料要根据气门挺杆的材料而定, 二者的材料要相匹配, 同时考虑到设计和使用的要求, 影响凸轮轴选用材料的因素有: 在发动机中的工作条件和使

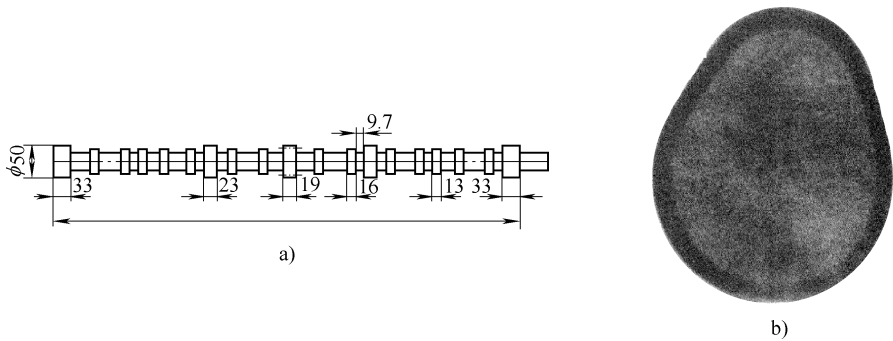


图 3-32 某凸轮轴与凸轮形状
a) 凸轮轴 b) 凸轮剖面及硬化层分布

用工作状况；凸轮轴与挺杆间的最大接触应力、相对滑动速度、润滑条件；匹配挺杆材料、硬度以及表面状态等。根据凸轮轴的工作条件，符合要求的材料有钢和铸铁，根据钢的加工方法可分为感应淬火钢、渗碳钢、渗氮钢（或氮碳共渗钢）；铸铁分为冷激铸铁、可淬硬铸铁、感应淬火球墨铸铁、氩弧重熔铸铁等，制造凸轮轴的材料及热处理工艺见表 3-23。

表 3-23 制造凸轮轴的材料及热处理工艺

材 料	预备热处理	热 处 理
15、20、15Cr、20Cr	调质或正火	渗碳淬火 + 低温回火
40、45、50	调质或正火	感应淬火 + 低温回火
稀土-镁球墨铸铁	正火	感应淬火或等温淬火 + 低温回火
镍铬钼合金铸铁，铜钒钼合金铸铁	低温回火	感应淬火 + 低温回火

一般凸轮轴采用渗碳钢和中碳钢制造，高功率的高速发动机凸轮轴采用镍铬钼（或铝）合金铸铁、铜钒钼合金铸铁制造。合金铸铁的弹性模量比中碳钢和球墨铸铁的低，故能够减小接触压力和保持表面的润滑油膜，铸铁中加入合金元素可明显提高铸铁的力学性能或物理化学性能，如铬、铜、镍、钼和钒等显著改变铸铁的耐磨性，铬、铜、镍、磷和硅能提高铸铁的耐蚀性，同时铬、镍、钼、硅等元素增强了耐热性。通常用 45 钢（最佳碳质量分数 0.40% ~ 0.47% 可保证合适的淬透性）、50Mn2 钢等制作凸轮轴，具有工艺简单、制造成本低等特点，其毛坯晶粒度控制在 6 ~ 8 级，获得的各项技术指标完全符合要求。部分凸轮轴用铸铁及其性能要求见表 3-24。

表 3-24 部分凸轮轴用铸铁及其性能要求

材料类型（或牌号）	性能要求
球墨铸铁 QT700-2、QT450-10 等	球墨铸铁等温淬火，硬度为 42 ~ 51HRC
冷激铸铁	造型时在凸轮部位预置冷铁，用灰铸铁（可含铜、铬和钼等合金元素）浇注时，用冷铁加大局部冷却速度，并形成白口层，硬度≥55HRC，不经热处理即可使用
特殊铸铁	针对凸轮轴的工况，对铸铁的化学成分与碳化物含量做出规定，凸轮轴杆部硬度为 245 ~ 321HBW，凸轮及轴承档中频感应淬火与低温回火，硬度≥57HRC

冷激铸铁通常不需要热处理，其表面存在软硬相间的复相组织，使其有很高的硬度和低的摩擦因数，不会发生粘着现象。因此具有最优良的抗擦伤性能、较好的抗点蚀剥落性和较高的耐磨性，该类铸铁一般含碳量高，以保证冷激层的硬度和碳化物的含量。凸轮轴常用合金铸铁和冷激铸铁的化学成分见表 3-25 和表 3-26。

表 3-25 凸轮轴常用合金铸铁的化学成分

铸铁名称	化学成分（质量分数,%）									
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Cu
镍铬钼铸铁	3.2 ~ 3.4	2.0 ~ 2.2	0.65 ~ 0.85	<0.10	<0.10	0.40 ~ 0.50	0.90 ~ 1.10	0.40 ~ 0.45	—	
铜钼钼铸铁		1.90 ~ 2.10	0.70 ~ 0.90			—		0.40 ~ 0.60	0.30 ~ 0.50	0.80 ~ 1.00

表 3-26 凸轮轴常用冷激铸铁的化学成分

化学成分（质量分数,%）							
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
3.6	2.0	0.7	≤0.15	≤0.15	0.2	0.5 ~ 1.1	0.2
	1.5	0.6	—	—	—	0.1 ~ 0.3	—

合金铸铁的加工工艺流程为铸造→去应力退火（590℃ × 5h 加热后炉冷至 200℃ 出炉空冷）→机械加工→等温淬火（870℃ 加热，在 240 ~ 300℃ 硝盐浴中冷却 60min 后提出空冷）→回火（590℃ × 5h），其组织由珠光体 + 少量铁素体变为回火索氏体。

3. 凸轮轴的热处理

(1) 技术要求 根据材料的不同，其技术要求存在差异，具体如下：

1) 低碳钢化学热处理的技术要求为渗碳处理后渗碳层深 $1.5 \sim 2\text{mm}$, 凸轮、支承轴径和偏心轮的表面硬度为 $55 \sim 63\text{HRC}$, 齿轮的硬度为 $45 \sim 58\text{HRC}$; 凸轮轴进行氮碳共渗处理, 可明显提高抗擦伤能力和防止出现热咬合的能力, 其耐磨性为中碳钢淬火后的两倍。

2) 45 钢凸轮轴的技术要求为凸轮、支承轴径和偏心轮的表面硬度为 $55 \sim 63\text{HRC}$, 硬化层深 $2 \sim 5\text{mm}$, 齿轮的硬度为 $45 \sim 58\text{HRC}$, 硬化层深 $2 \sim 5\text{mm}$ 。

3) 合金铸铁凸轮轴的技术要求为凸轮、支承轴径和偏心轮的表面硬度为 $48 \sim 58\text{HRC}$, 硬化层深 $2 \sim 5\text{mm}$, 齿轮的硬度为 $45 \sim 58\text{HRC}$, 硬化层深 $2 \sim 5\text{mm}$ 。采用感应加热可提高凸轮轴的强度和耐磨性, 确保其在工作过程中具有高的疲劳强度和使用寿命。

(2) 热处理工艺参数 对渗碳钢和中碳钢而言, 在最终的热处理前要对凸轮轴进行调质处理或正火处理, 以获得均匀细化的索氏体组织, 确保基体有足够的强度和良好的韧性来满足凸轮轴的工作需要。

1) 凸轮轴的感应热处理工艺是广泛采用的, 一般汽车、拖拉机等内燃机凸轮轴大多采用感应加热完成表面的热处理, 可提高凸轮轴基体表面的抗拉强度、硬度、耐磨性和疲劳极限, 而心部仍保持足够的塑性和韧性, 根据其结构和技术要求可对凸轮轴的凸轮、支承轴径、偏心轮和齿轮等主要工作表面在精加工前分别进行感应处理。为获得要求的硬度, 应选择理想的感应器。感应器一般分为两类: 圆形感应器应用于中频感应淬火, 使凸轮轴旋转, 感应器内径大于支承轴径, 间隙较大; 仿凸轮轴形感应器是根据高频感应淬火或特殊形状的具体要求而制作的, 凸轮与感应器的间隙很小, 因此硬度均匀, 可根据凸轮轴各部分硬化层的深度来改变仿形形状, 该类感应器分为单圈和双圈两种。凸轮轴感应加热用双圈圆形感应器如图 3-33 所示。另外为了获得凸轮周边均匀的硬化层, 可使用分开式感应器。

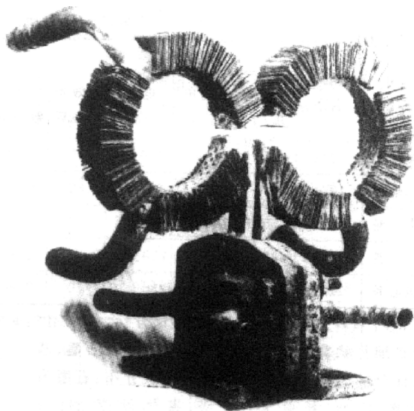


图 3-33 凸轮轴感应加热
用双圈圆形感应器

在一根凸轮轴上的若干个凸轮、主轴径、齿轮和偏心轮要进行感应淬火, 而它们之间的距离较近, 淬火时必然会影响到彼此的硬度, 故中频淬火感应器必须有屏蔽装置来进行保护, 磁场屏蔽方法有三种。第一种为铜屏屏蔽法, 在感应器的两侧加上云母片或胶木板, 外侧加上铜管或铜板制成的铜环, 如图 3-34 所示。其原理为磁力线穿过铜环时产生感应电流, 而感应电流产生的磁力线与有效圈上产生的中频电流产生的磁

力线方向相反，故削弱或抵消了逸散的磁力线，使得两侧的凸轮或主轴径的边缘不会被加热。第二种为低碳钢环屏蔽法，与铜环屏蔽法相似，装上低碳钢或工业纯铁制造的环，如图 3-35 所示。其工作原理为钢环或纯铁环的相对磁导率高于空气，对逸散的磁力线有吸引或约束作用，因此可保护相邻的凸轮或主轴径的边缘免受加热，资料介绍同时采用两种屏蔽方法效果更好。第三种为硅钢片屏蔽法，即在有效圈外侧卡上一圈硅钢片，经过磷化处理，同样具有良好的屏蔽作用。

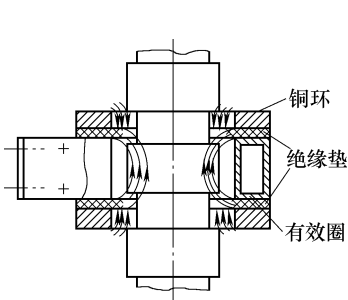


图 3-34 铜环屏蔽装置示意图

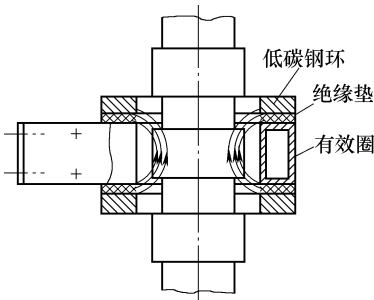


图 3-35 钢环屏蔽装置示意图

对于材料为中碳钢的凸轮轴来说，由于感应淬火是易控制、节能、生产率高、产品质量好、便于实现机械化自动化的热处理工艺，因此在实际热处理过程中得到了极为广泛的应用，它避免了使用盐浴炉、电阻炉等时工件必须完全加热的弊端。考虑到 6102 发动机凸轮轴要求的硬化层深，因此选择中频感应淬火，常用的频率为 2500Hz 和 8000Hz。该凸轮轴的热处理安排在粗磨凸轮、偏心轮之前，在淬火机床上进行中频感应淬火，硬化层深度为 2~5mm，淬火后硬度为 55~63HRC。需要注意的是感应器的合理设计与淬火质量问题，表 3-27 为 6102 发动机凸轮轴（45 钢）感应淬火（中频感应淬火）工艺规范。

表 3-27 6102 发动机凸轮轴（45 钢）感应淬火（中频感应淬火）工艺规范

淬火部位	变压器匝数比	电 参 数					热处理参数				淬火硬度 HRC	硬化层深度/mm
		空载电压 /V	载荷电压 /V	电流 /A	有效功率 /kW	功率因数	加热时间 /s	间隙时间	冷却时间 /s	水压 /MPa		
大轴径	19/1	750	740±5	270±5	95	0.96	4.4	0	4.4	0.15	55~63	3~4
小轴径	19/1			245±5	82	0.95	4.0		4.0			—

(续)

淬火部位	变压器匝数比	电 参 数					热处理参数				淬火硬度 HRC	硬化层深度/mm
		空载电压 /V	载荷电压 /V	电流 /A	有效功率 /kW	功率因数	加热时间 /s	间隙时间	冷却时间 /s	水压 /MPa		
齿轮	19/1	750	740 ± 5	215 ± 5	62	0.90	4.3	0	1.3	0.15	45 ~ 58	—
凸轮	12/1		700 ± 5	220 ± 5	70	0.96	4.1		2.5		58 ~ 63	2.9 ~ 4.8
偏心轮	12/1		650 ± 5	230 ± 5			3.3		4.4			

电流的频率不同则淬硬层的深度不同，频率越高淬硬层的深度越小，因此在生产过程中应根据零件的具体技术要求和工作状况来确定合理的工艺参数。中碳钢制作的凸轮轴采用中频感应淬火处理是正确的，凸轮轴主要工作表面的中频感应淬火分步进行，首先进行支承轴径和齿轮表面的淬火，最后完成凸轮、偏心轮表面的淬火处理。45 钢和合金铸铁凸轮轴表面淬火的工艺参数及质量要求见表 3-28。

表 3-28 45 钢和合金铸铁凸轮轴表面淬火的工艺参数及质量要求

项 目	45 钢	合 金 铸 铁
淬火温度/℃	860 ~ 900	850 ~ 900
设备比功率/(kW/cm ²)	1.50 ~ 2.50	≤1
加热时间/(s/个)	35	—
加热温度/℃		50 ~ 150
冷却	冷却时间为加热时间的 0.8 ~ 1 倍	油冷
冷却压力/MPa	0.15 ~ 0.30	—
冷却水温度/℃	15 ~ 30	—
回火	200 ~ 250℃ 回火，150℃ 再次回火	180 ~ 200℃，保温 1 ~ 1.5h
硬化层深度/mm	2 ~ 5	—
表面硬度（HRC）	55 ~ 63	48 ~ 58
马氏体的级别	3 ~ 7	细针状马氏体

2) 球墨铸铁凸轮轴的贝氏体等温淬火工艺见表 3-29。球墨铸铁凸轮轴一般选用 QT600-3，除少数采用中频感应淬火或进行氮碳共渗外，绝大部分凸轮轴在毛坯正火或去应力退火加工后，进行贝氏体的等温淬火处理，获得理想的下贝氏体组织和硬度，使凸轮轴具有良好的综合力学性能。

表 3-29 球墨铸铁凸轮轴的贝氏体等温淬火工艺

序号	化学成分（质量分数,%）							贝氏体等温淬火参数					硬度 HRC
	C	Si	Mn	S	P	Mg	RE	加热温度 /℃	保温时间 /min	等温温度 /℃	停留时间 /min	显微组织	
1	3.7 ~ 3.9	2.0 ~ 2.3	0.5 ~ 0.8	≤0.02	<0.1	0.035 ~ 0.045	0.025 ~ 0.04	860 ± 10	30	270 ± 10	60	贝氏体 + 体积分数 ≤ 5% 的马氏体组织 + 少量残留奥氏体	34 ~ 38
2	3.5 ~ 3.7	2.4 ~ 2.6	0.7 ~ 0.9	≤0.02	<0.1	0.04 ~ 0.06	0.03 ~ 0.05	870 ± 10	15	240 ± 10	45	贝氏体 + 体积分数 ≤ 10% ~ 15% 的马氏体组织 + 少量残留奥氏体	44 ~ 48
3	3.7 ~ 4.2	2.4 ~ 2.6	0.5 ~ 0.8	≤0.02	≤0.10	≥0.04	0.02 ~ 0.04	860 ± 10	30	290 ~ 300	45	贝氏体 + 少量残留奥氏体	39 ~ 48

球墨铸铁凸轮轴的热处理工艺包括一般的正火、等温或分级淬火、表面改性处理等，表面热处理和化学热处理与普通的热处理工艺相比，可获得最佳的表面硬化层，提高了凸轮轴的疲劳强度、抗弯强度，并使其具有良好的耐磨性和耐蚀性等，具体见表 3-30。当硬度不足则将造成性能和使用寿命的降低，而过厚的硬化层，会增加凸轮轴的脆性和内应力，出现早期的失效和损坏，因此选择合理的工艺方法，对于凸轮轴的寿命有重大的影响。

表 3-30 球墨铸铁凸轮轴经不同热处理后耐磨性对比

材料牌号	热处理状态	磨痕宽度/mm	磨损量/μm	失重/g
QT600-3	正火	1.75	0.05	0.48
QT600-3	等温淬火	1.30	0.05	0.14
QT600-3	气体氮碳共渗	1.10	0.04	0.08
QT600-3	液体氮碳共渗	1.00	0.04	0.06

目前对球墨铸铁凸轮轴采用热处理强化和冷加工复合强化新工艺，即球墨铸铁凸轮轴经热处理后再进行滚压处理。如正火 + 滚压轴颈与曲柄臂过渡圆角处，在表面形成了 0.5mm 深的冷加工硬化层，增大了残留压应力的作用，提高使用寿命 70% 以上，效果十分明显，在生产中得到了十分广泛的应用。

凸轮轴在表面处理前要进行正火或调质处理, 以使其得到良好的力学性能。为提高凸轮轴的耐磨性和耐蚀性, 可对其进行化学热处理 (如氮碳共渗等)。图 3-36 所示为 SH760 汽车凸轮轴的氮碳共渗工艺曲线, 材质为合金铸铁, 渗层深 $0.10 \sim 0.15\text{mm}$, 化合物层为 $4 \sim 6\mu\text{m}$, 硬度在 900HV 以上, 使用寿命可提高三倍以上, 在表面形成了 CrN 、 MnN 等合金渗氮物。

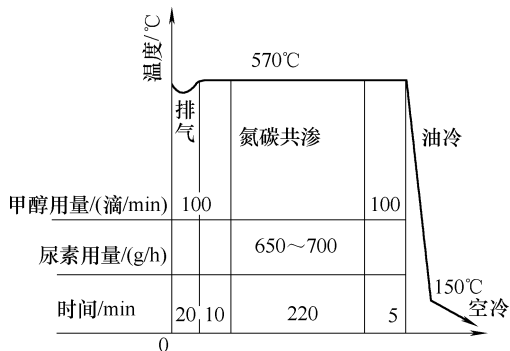


图 3-36 SH760 汽车凸轮轴的氮碳共渗工艺曲线

4. 凸轮轴热处理工艺分析与操作要点

1) 为防止相邻的部位由于磁场逸散发生退火, 凸轮轴感应器上设计安装了聚磁装置, 用高导磁材料制作, 如硅钢片、铁氧体等。为提高生产率, 还开发了凸轮轴多部位同时淬火技术。该技术可以同时一根凸轮轴上的所有淬火部位进行淬火加工, 已在东风的 EQ491 发动机凸轮轴生产线上得到使用。

2) 凸轮轴中频感应淬火后利用余热进行自回火, 可消除淬火组织应力, 在正火 + 中频感应淬火后, 心部为细片状珠光体, 硬度为 255HBW , 心部具有良好的强度和高的韧性。

应确保感应器上直径为 $1.5 \sim 2\text{mm}$ 的喷射孔无堵塞, 水压符合设计要求, 凸轮轴可旋转或静止不动。大批生产时, 所有凸轮轴上的各淬火部位应一次同时加热完成, 如分段加热则容易出现软点或软带, 影响到凸轮轴表面的耐磨性等, 对其使用寿命等有直接的影响。

感应淬火后的凸轮轴要立即放进井式回火炉内或硝盐回火炉中, 如要采用感应回火或自回火则要掌握好加热的工艺参数, 自回火的温度要高于炉内回火 $50 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

3) 球墨铸铁制作的凸轮轴大多进行等温淬火, 以获得贝氏体组织, 其淬火冷却介质为硝盐浴, 由于凸轮轴在盐浴中加热, 淬火时带入的氯化盐使硝盐的老化明显加快, 因此要定期捞渣和补充新硝盐。

淬火后的零件用煮沸的热水清洗, 将凸轮轴上粘附的硝盐清除干净, 否则会出现吸潮和表面锈蚀, 将直接影响到产品的尺寸和表面质量。

4) 中碳钢制作的凸轮轴采用中频感应淬火, 凸轮轴主要工作表面的中频感应淬火应分步进行, 首先进行支承轴径和齿轮表面的淬火, 最后完成凸轮、偏心轮表面的淬火处理, 这样可确保热处理后的硬度和组织不受影响。

5) 高频感应加热的感应器应根据要求制作, 可制成仿形或圆形。其高度比凸

轮轴高4~8mm，内径与轴径的间隙为3~4mm；高频加热器上有直径为1.5~2mm的喷射孔，凸轮轴可旋转或静止不动。大批生产时，所有凸轮轴上的各淬火部位是一次同时加热完成的。

6) 有资料指出，QT600-3 球墨铸铁凸轮轴可采用等温淬火处理（ADI），具有提高韧性，变形小，耐磨性良好等特点，在260~290℃的硝盐浴中进行等温淬火处理后，如果出现淬裂现象，在化学成分合格的前提下，采取确保井式炉温度均匀，将加热炉与等温硝盐浴的温差控制在5~10℃，将等温硝盐槽的温度控制在要求的温度范围内，定期捞硝盐渣与补充新盐等措施，即可使凸轮轴等温淬火裂纹得到有效的控制。

7) 凸轮轴感应淬火的质量检验见表3-31。

表 3-31 凸轮轴感应淬火的质量检验

检 验 名 称	检 验 项 目		检 验 要 求	检验设备或方法
显微硬度	淬硬层组织	钢	3~7 级马氏体	金 相 显 微 镜 400 ×
		合金铸铁	细针状马氏体，基体上均匀分布着碳化物网或针、石墨以及少量残留奥氏体	
表面质量	淬硬区长度及位置		按要求执行	硬度法或腐蚀法
	裂纹		不允许有任何裂纹	探伤机
	其他		淬火表面不允许有烧伤	肉眼或放大镜
硬度	表面硬度		按要求执行	维氏硬度计
	淬硬层深度			

5. 凸轮轴感应淬火的常见缺陷及产生原因和防止方法（表3-32）

表 3-32 凸轮轴感应淬火的常见缺陷及产生原因和防止方法

缺陷的形式和类型	产生的原因	防止方法
凸轮侧面存在软点	①曲轴转动过快，在凸轮的背水面形成软点或有低的硬度 ② 冷却条件不好（水压低、堵塞等）	将转速控制在 50r/min
感应加热时将相邻的已淬火轴径回火	① 淬火部位间隙太小 ② 感应线圈与淬火部位的相对位置不合适	① 在感应器上加屏蔽装置 ② 感应器两侧装导磁体 ③ 调整感应线圈与淬火部位的相对位置

(续)

缺陷的形式和类型	产生的原因	防止方法
凸轮尖部和边角淬硬层崩落	① 凸轮尖部过热 ② 淬硬层过深 ③ 冷却速度快 ④ 自回火温度低 ⑤ 钢的含碳量高 ⑥ 感应器与凸轮的间隙过小 ⑦ 有效圈的高度过高	① 缩短加热时间 ② 加大感应器的内径和减小感应器的有效高度 ③ 降低水压和提高冷却水温 ④ 确保合适的自回火温度 ⑤ 选用符合成分要求的材料 ⑥ 调整凸轮和感应器的相对位置 ⑦ 合理控制感应线圈的整体高度
凸轮尖部硬度偏低和金相组织级别偏低	① 淬火加热温度低 ② 原始组织粗大 ③ 加热时间短、组织未完全转变	① 在感应器有效圈外圆装Ⅱ型硅钢片、降低比功率 ② 正火处理控制晶粒度在7~8级 ③ 适当延长加热时间
凸轮局部熔化或金相组织中残留奥氏体过多	① 淬火加热温度过高 ② 凸轮轴未进行旋转 ③ 感应器与凸轮轴的间隙太小 ④ 感应器的定位不牢	① 缩短加热时间或减小比功率 ② 确保凸轮轴正常旋转 ③ 加大感应器的内径或减小感应器有效圈的高度
铸铁凸轮的硬度不均匀或硬度偏低	① 毛坯铸态组织不合格 ② 毛坯铸态硬度低 ③ 加热温度低	① 毛坯铸态硬度和组织合格 ② 适当延长加热时间

3.3.2 气门挺杆

1. 工作条件与技术要求

气门挺杆是汽车发动机上的关键部件，气门挺杆在发动机气缸体导管内上下往复运动，将凸轮作用于它的推力传给推杆，以此来传递动力，同时绕自身轴线作旋转运动，它处于凸轮和摇臂之间。在工作过程中与凸轮反复进行高应力的接触，彼此之间的摩擦力较大，挺杆与凸轮接触的端面为内球面，与凸轮相对滑动为点接触，故要承受较大的接触应力作用。挺杆有菌式、筒式和滚轮式三种，其底部分球面和平面两类。对挺杆的技术要求为表面有高的硬度和耐磨性，基体组织具有良好的综合力学性能。

一般气门挺杆的构造如图 3-37 所示，从图中可以看出，挺杆的下部有油孔，经推杆流入挺杆的机油从油孔流出润滑凸轮和挺杆。其损坏形式为磨损、擦伤和接触疲劳破坏。

从挺杆的工作条件可知，为满足需要挺杆应具有以下力学性能：一定的强度和韧性，表面有高的硬度和良好的耐磨性，高的抗擦伤能力等。

2. 材料的选择

从上述挺杆的受力分析可知，气门挺杆与凸轮构成一对摩擦副，合金铸铁制挺杆与凸轮轴之间相互作用，因此必须提高它们的耐磨性和抗擦伤性，经过表面强化处理的合金铸铁挺杆和凸轮轴，耐磨性和抗擦伤性得到提高。凸轮与挺杆组合后，其失效形式多为二者异常磨损，一般为点蚀（Pitting）和刮伤（Scuffing）两大类，二者的相互摩擦短时间内会早期的熔化磨损。气门挺杆材料一般选用渗碳钢、中碳钢和铸铁等，气门挺杆与凸轮轴材料的选用见表 3-33。凸轮和挺杆产生异常磨损的原因和对策见表 3-34。目前世界各国用合金铸铁制作挺杆，并进行淬火处理，在润滑油中加入添加剂可降低表面的磨损。可用磷酸膜或铁氧体（Ferrox）进行表面处理，这种方法对提高早期的磨合性十分有效，从而防止刮伤。

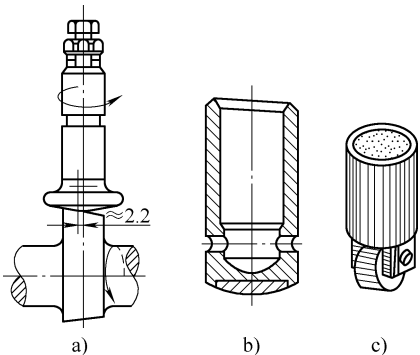


图 3-37 气门挺杆的构造

a) 菌式 b) 筒式 c) 滚轮式

表 3-33 气门挺杆与凸轮轴材料的选用

序 号	挺杆（材料和工艺）	凸轮轴（材料和工艺）
1	15Cr 钢渗碳	45 钢感应淬火
2	20 钢渗碳	球墨铸铁感应淬火
3	20 钢渗碳	球墨铸铁等温淬火
4	合金铸铁淬火	合金铸铁淬火
5	合金铸铁冷激	球墨铸铁感应淬火
6	合金铸铁冷激	球墨铸铁等温淬火
7	合金铸铁冷激、氮碳共渗	20Cr 钢渗碳

表 3-34 凸轮和挺杆产生异常磨损的原因和对策

产生原因	对 策
表面压力过大 材料的组合不好 润滑不适当 润滑不良	改进气门结构（弹簧负荷、凸轮型面、凸轮和挺杆的接触面积） 选择适当的材料，进行表面处理 根据使用的材料选择适当的润滑油 改善供油方法

凸轮和挺杆材料的典型组合实例见表 3-35。

表 3-35 凸轮和挺杆材料的典型组合实例

凸 轮	挺 杆	使用的国家和地区	特 征	存在的问题
合金铸铁	合金铸铁	美国	耐点蚀，对润滑油性质不敏感	刮伤、磨损
	冷激铸铁	欧洲	—	挺杆易点蚀
渗碳钢淬火		美国、欧洲	凸轮轴的刚度和耐磨性好	
		日本、英国、欧洲	耐刮伤	点蚀
冷激铸铁	渗碳钢		凸轮轴摇臂刚度好	摇臂球面刮伤

3. 机械加工工艺流程

(1) 渗碳钢挺杆 常用渗碳钢主要有 15Cr、20Cr、20 等，它们正火后具有良好的韧性、强度和理想的金相组织，经渗碳或碳氮共渗处理表面形成高的硬度和耐磨性，而内部有一定的强度和良好的韧性。其流程为：下料→锻造→机械加工成形→渗碳或碳氮共渗→热处理→精加工→表面处理。渗碳层和碳氮渗层深 0.6 ~ 1.5mm 即可满足工作需要，内螺纹应避免渗碳或碳氮共渗，否则螺纹的硬度高、脆性大，会在工作过程中出现早期失效。

(2) 中碳钢挺杆 通常选用 45 钢和 45Cr 钢，中碳钢经调质处理后，整体形成索氏体组织，具有最佳的综合力学性能，最终热处理方式为高频感应淬火，硬化层深度在 2mm 以上，硬度大于 55HRC。

(3) 合金铸铁挺杆 合金铸铁在磨削时会产生表面应力，在机械加工中采用的材质有镍铬钼合金铸铁、铬钼铜合金铸铁等。合金铸铁挺杆有三大类：①整体铸造合金挺杆；②用钢制造杆体，在头部焊上合金铸铁；③单体铸造合金铸铁挺杆头与钢制杆体对焊。

以整体铸造合金铸铁挺杆为例，其加工流程为：铸造→间接端部冷激→机械加工→去应力退火→精加工→表面处理→成品，其硬化层深度应大于 2mm。

筒式挺杆的简单工艺流程为：棒料切割→料头淬火→抛丸、磷化、皂化→冷挤压→齐总长和堆焊槽→堆焊合金→回火→磨外圆→磨端面→倒角→磨外圆→精抛球面→磷化→精磨外圆→成品检验。

(4) 20 钢挤压、堆焊合金 通常采用 20 钢或 25 钢进行反挤压成形，其冷挤压工艺流程为：制备毛坯→软化退火→酸洗→磷化、皂化处理→反挤压成形→堆焊合金→抛丸→机械加工等→磷化→成品检验。

4. 挺杆的热处理工艺

挺杆和凸轮轴是一对摩擦副，因此两者材料的选用和热处理的要求是相互制约的。在大批生产中，钢制气门挺杆通常通过冷挤压或热锻成形。挺杆和凸轮轴材料的选用与热处理工艺见表 3-36，凸轮和挺杆的表面硬度见表 3-37。

表 3-36 挺杆和凸轮轴材料的选用和热处理工艺

用 途	挺杆材料和工艺	硬度（HRC）	凸轮轴材料和工艺	硬度 HRC
载货汽车与拖拉机的发动机	35 钢碳氮共渗	57 ~ 62	45 钢感应淬火	55 ~ 63
	冷激铸铁	≥52	45 钢感应淬火	
	20Cr 钢渗碳	55 ~ 62	45 钢感应淬火	55 ~ 62
	冷激合金铸铁	≥55	球墨铸铁感应淬火	45 ~ 55
	20 钢渗碳	53 ~ 58	球墨铸铁感应淬火	
	合金铸铁淬火	58 ~ 63	45 钢感应淬火	55 ~ 63
吉普、拖拉机的发动机	35 钢堆焊合金铸铁	60 ~ 66	45 钢感应淬火	
	20Cr 钢渗碳	55 ~ 63	球墨铸铁贝氏体等温淬火	43 ~ 50
重型载货汽车发动机	合金铸铁氮碳共渗	800HV0.2	20 钢渗碳淬火	58 ~ 62
	50Mn2 钢淬火或冷激铸铁	47 ~ 54	球墨铸铁贝氏体等温淬火	43 ~ 51

表 3-37 凸轮和挺杆表面硬度

材 料	凸 轮 轴	挺 杆
合金铸铁	48 ~ 52HRC	55 ~ 62HRC
冷激铸铁	45 ~ 53HRC	52 ~ 58HRC
渗碳钢淬火	58 ~ 64HRC	58 ~ 64HRC

（1）渗碳钢挺杆的热处理 这里以 15Cr 钢为例，分析其热处理工艺规范和注意事项。

1) 挺杆在井式渗碳炉或可控气氛炉内完成渗碳工艺，选择的渗碳温度为 900 ~ 920℃，所用渗碳剂为煤油，稀释剂为甲醇，具体流量根据渗层厚度、炉膛体积以及装炉量的多少而定，试样抽查合格后，随炉冷却。

2) 渗碳后的挺杆需重新进行热处理。目的是使挺杆获得较高的表面硬度、高的接触疲劳强度和耐磨性。为防止挺杆表面出现脱碳现象，热处理的加热是在盐浴炉中进行的，淬火工艺装备具有吊挂式结构，材料为 Q235 钢，上面焊有许多短柱，将挺杆挂在上面。加热温度为 840 ~ 850℃，每挂保温 8min，在机械油中油冷，淬火后的端面硬度大于 62HRC；为了确保硬度符合要求，在硝盐炉中的回火温度为 180 ~ 200℃，保温 90min，硬度为 54 ~ 62HRC。

挺杆回火后应清洗干净，除净回火粘附的硝盐等，防止其表面锈蚀，影响挺杆

的使用性能。该类挺杆的缺点为储油性差和耐磨性较差，容易出现表面擦伤。

渗碳钢经渗碳或碳氮共渗热处理后的金相组织为细针状马氏体组织，不允许有网状游离渗碳体和游离状态的铁素体，从渗层至中心不能有骤然转变的金相组织，挺杆心部为低碳马氏体。

(2) 合金铸铁挺杆的热处理 采用合金铸铁制造挺杆，可使基体硬度提高，其使用性能与挺杆的显微组织、表面及心部硬度、表层和次表层的残留应力等有关，当出现网状碳化物时会造成挺杆的早期失效——点蚀剥落和快速磨损等。研究表明，显微组织中回火马氏体基体上分布的针状碳化物以及出现的点状、片状石墨均提高使用性能，表面硬度越高则耐磨性越好。几种常见合金铸铁挺杆的化学成分见表 3-38。

表 3-38 几种常见合金铸铁挺杆的化学成分

合金铸铁 名称		化学成分（质量分数,%）									
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti
铬钼合金		3.45 ~ 3.65	2.0 ~ 2.4	0.6 ~ 0.9	≤0.12	≤ 0.20	0.2 ~ 0.4	0.3 ~ 0.5	—	—	—
镍铬钼 合金	成分1	3.5 ~ 3.7	1.7 ~ 1.9	0.7 ~ 1.0	<0.10	<0.10	0.25 ~ 0.35	0.4 ~ 0.6	0.5 ~ 0.7	—	—
	成分2	3.2 ~ 3.4	2.0 ~ 2.4	0.65 ~ 0.85	<0.10	<0.10	0.9 ~ 1.10	0.40 ~ 0.65	0.4 ~ 0.5	—	—
	成分3	3.6 ~ 3.8	1.8 ~ 2.0	0.8 ~ 0.95	<0.03	<0.020	0.45 ~ 0.55	0.08 ~ 0.12	0.7 ~ 0.8	—	—
镍铬钼铜 合金		3.4 ~ 3.6	2.1 ~ 2.4	0.7 ~ 0.9	<0.05	<0.10	0.4 ~ 0.6	0.4 ~ 0.6	0.5 ~ 0.7	0.15 ~ 0.2	0.07 ~ 0.10
铬钼铜合金		3.6 ~ 3.8	1.7 ~ 1.9	0.6 ~ 0.8	<0.10	<0.12	0.3 ~ 0.6	0.4 ~ 0.6	—	0.6 ~ 0.8	—

(3) 冷激合金铸铁挺杆的热处理 冷激铸铁（采用干砂型铸造，端面加冷铁激冷获得的）具有大量的针状碳化物，具有坚固的骨架作用，表面部分珠光体经磨削成微凹坑又起到储油的作用，从而使得其耐磨性、减摩性和储油性较好。经淬火、回火后形成马氏体组织，提高了挺杆的接触应力和挺杆的疲劳性能。冷激合金铸铁的失效形式为疲劳剥落，因此热处理的目的提高抗擦伤性能，目前挺杆一般使用铬钢或铬镍钼合金铸铁。为了确保挺杆表面无氧化脱碳，使用盐浴炉加热，要严格控制加热温度，确保脱氧彻底。

冷激合金铸铁挺杆的热处理工艺见表 3-39。

表 3-39 冷激合金铸铁挺杆的热处理工艺

材料名称	化学成分 (质量分数,%)	热处理工艺参数	端面硬度 HRC	显微组织
铬钼合金 铸铁	C3.45 ~ 3.65 Si2.0 ~ 2.4 Mn0.6 ~ 0.9 S≤0.12 P≤0.20 Cr0.2 ~ 0.4 Mo0.3 ~ 0.5	去应力退火 550 ~ 570℃ × 120min, 炉冷到 300℃ 出炉空冷	≥52	莱氏体 + 少量珠 光体, 有少量点状 石墨
镍铬钼合金 铸铁	C3.5 ~ 3.7 Si1.7 ~ 1.9 Mn0.7 ~ 1.0 S < 0.10 P < 0.10 Ni0.5 ~ 0.7 Cr0.25 ~ 0.35 Mo0.4 ~ 0.6	①去应力退火 540 ~ 560℃ × 120min ② 氮碳共渗 560 ~ 570℃ × 180min, 空冷至 350 ~ 400℃ 油冷	铸态 55 ~ 62, 氮 碳 共 渗 后 > 785HV0.2	球面为较细的针 状莱氏体, 基体为 85% (体积分数) 的珠光体, 白口层 深 2 ~ 6mm
	C3.2 ~ 3.4 Si2.20 ~ 2.40 Mn0.65 ~ 0.85 S < 0.10 P < 0.10 Ni0.4 ~ 0.5 Cr0.90 ~ 1.10 Mo0.4 ~ 0.65	290 ~ 310℃ × 90 ~ 120min 空冷	60 ~ 65 (20 钢杆体高频堆 焊)	挺杆端部工作面 为 30% ~ 60% (体 积分数) 的碳化 物 + 马氏体 + 15% (体积分数) 的残 留奥氏体 + ≤0.5% (体积分数) 的细 点状石墨
		① 淬火 830 ~ 850℃ × 120min, 油冷 ② 回火 150 ~ 170℃ × 120min	铸 态 277 ~ 352HBW 热 处 理后 57 ~ 63	回火马氏体 + 少 量点状石墨 + 少量 渗碳体 (垂直于表 面, 要求保留体积 分数为 10% 的渗 碳体)

(续)

材料名称	化学成分 (质量分数, %)	热处理工艺参数	端面硬度 HRC	显微组织
镍铬钼合金 铸铁	C3.6 ~ 3.8 Si1.8 ~ 2.0 Mn0.8 ~ 0.95 S < 0.03 P < 0.02 Ni0.7 ~ 0.8 Cr0.45 ~ 0.55 Mo0.08 ~ 0.12	① 去应力退火, 410 ~ 430℃ × 150, 炉冷至 150℃ 空冷 ② 淬火, 840 ~ 850℃ × 5min + 180 ~ 210℃ × 3min 硝酸盐浴 ③ 回火, 170 ~ 200℃ × 120min	63 ~ 65	基体: 碳化物 + 极少量莱氏体 + 马氏体 石墨: 呈点状均匀分布, 体积分数 < 3%, 白口层深 3 ~ 8mm
镍铬钼铜合金铸铁	C3.4 ~ 3.6 Si2.1 ~ 2.4 Mn0.7 ~ 0.9 S < 0.05 P < 0.1 Cr0.4 ~ 0.6 Mo0.4 ~ 0.6 Cu0.15 ~ 0.20 Ni0.5 ~ 0.7 Ti0.07 ~ 0.1	① 去应力退火, 540 ~ 560℃ × 240min, 空冷 ② 淬火, 850 ~ 870℃ × 80 ~ 90min, 油冷 ③ 回火, 170 ~ 190℃ × 90min	58 ~ 63	—
		① 去应力退火, 550 ~ 570℃ × 120min, 空冷 ② 淬火, 870 ~ 890℃ × 6min, 油冷, 冷至 120℃ 出油空冷 ③ 回火, 160 ~ 180℃ × 120min	≥ 63	—
铬钼铜合金铸铁	C3.6 ~ 3.8 Si1.7 ~ 1.9 Mn0.6 ~ 0.8 Cu0.3 ~ 0.6 Mo0.4 ~ 0.6 Cu0.6 ~ 0.8 S < 0.10 P < 0.12	510 ~ 530℃ × 120min, 炉冷, 200℃ 出炉空冷	58 ~ 63	—

需要注意的是气门挺杆 (CA141) 采用铬钼铜合金铸铁制造, 其工艺为时效处理 + 淬火处理 + 磷化处理, 时效处理为 550℃ × 3h 空冷, 淬火处理为 840 ~ 860℃ × 0.5h 油冷, 金相组织为淬火马氏体 + 少量点状石墨 + 碳化物, 硬度为 58 ~

62HRC，提高了挺杆的硬度与耐磨性。

另外为提高使用寿命，在冷激铸铁端面上高频堆焊合金，然后在 300℃ 进行回火处理，其作用为减小加热引起的应力集中，同时不会降低表面的残留压应力，因此使挺杆的使用寿命明显提高。

合金铸铁的铸态金相组织如下：基体为细珠光体，挺杆底部经冷激后工作表面为针状渗碳体、莱氏体和适量石墨。挺杆的热处理工艺参数和技术指标见表 3-40。

表 3-40 挺杆的热处理工艺参数和技术指标

材 料	预备热处理	最终热处理	技 术 要 求	
			渗层深度/mm	硬度 HRC
20Cr	退火	930℃ 渗碳后空冷，900℃ 正火，820℃ 淬火，280℃ 回火	1.2 ~ 1.6	53 ~ 60
35 钢堆焊合金铸铁	等温退火：860℃ 保温 2h，750℃ 保温 2h，空冷	高频堆焊后，用水激冷，300℃ × 3h 回火	堆焊层深≥1.5	60 ~ 66
35 钢或 Y15 钢	—	碳氮共渗：860℃ 水冷淬火后在 180℃ 保温 1.5h	42 ~ 0.4	57 ~ 62
冷激合金铸铁	退火：550℃ × 4h，炉冷	淬火：870℃，油冷，180℃ 回火	—	58 ~ 63
20Cr	正火：930℃ 保温结束空冷	940℃ 渗碳后空冷，860℃ 油淬，280℃ 回火	1.2 ~ 1.7	57 ~ 63
15Cr	—		1.0 ~ 1.4	58 ~ 63
20 钢	—	940℃ 渗碳后空冷，820℃ 油淬，280℃ 回火	1.1 ~ 1.5	53 ~ 58
冷激铸铁	550℃ × 6h	液体渗氮 560℃ × 3h，油淬	—	≥800HV
50Mn2	820℃ 退火，保温 3h 后炉冷到 600℃ 空冷	820℃ 加热，淬入轻柴油或 7 号机械油	—	57 ~ 54

通常挺杆热处理后工作面部分的硬度如下：钢制挺杆和冷激铸铁挺杆渗碳后为 58 ~ 65HRC，不淬火冷激铸铁挺杆硬度不低于 52HRC。而挺杆杆部和底座硬度为：钢制挺杆不低于 36HRC，铸铁挺杆为 241 ~ 285HBW。

根据挺杆的工作特点，既可对其进行整体热处理（盐浴淬火等），也可对其工作面进行高频感应淬火，事实上用这两种方法处理的挺杆存在下列缺陷：裂纹、变形、表面性能不高等。考虑到上述因素，选用火焰淬火可确保产品质量合格和质量稳定，同时降低了生产成本，取得了良好的效果，挺杆的火焰自动淬火设备示意图如图3-38所示，挺杆经振动料斗进入排料槽，由送料机构送入带有旋转机构的孔座内，同时乙炔加热喷嘴对挺杆底面进行加热，加热到设定时间后，挺杆被打料杆弹出滑入油槽冷却，然后进行下一轮循环。

挺杆的材料选用铬钼铜（CrMoCu）冷激合金铸铁，其火焰淬火工艺参数为：加热温度为 860 ~ 900min，挺杆的转速 30 ~ 60r/min，在 180 ~ 200℃ 回火 120min 后空冷。

检测结果：硬化层深度大于 3mm；冷激层深度大于 4mm；挺杆端面的硬度为 63 ~ 69HRC，杆部硬度为 93 ~ 104HBW；金相组织要求石墨 1 ~ 2 级，渗碳体 1 ~ 3 级，渗碳体数量 1 ~ 3 级。

经机械加工后的挺杆成品工作表面不应有裂纹、蜂窝孔、黑点、刻痕、凹坑等有害缺陷，其非工作表面允许有少量的黑点和加工痕迹等。

对于需要磷化或其他表面处理的挺杆，其底部表面应进行磁粉无损检测，以确保挺杆的内在质量合格，同时也避免了后面工序的无价值的加工。

（4）挺杆的表面处理 在气体或液体介质中进行表面处理后，挺杆表面的硬度提高、耐蚀性增强，端面和内球窝抗冲击性提高，因此其使用寿命得到提高。挺杆的氮碳共渗一般采用液体氮碳共渗工艺，氮碳共渗的技术要求和工艺参数如下：加热温度 560 ~ 585℃，共渗时间 2 ~ 3h，氮碳层深 $\geq 0.05\text{mm}$ ，表面硬度 $\geq 850\text{HV}0.2$ ，处理后明显提高了挺杆端面 and 球窝的硬度，延长了挺杆的使用寿命。

1) 挺杆的氮碳共渗处理。可进行氮碳共渗处理的气门挺杆材料通常为 Cr12W 和合金铸铁两种。氮碳共渗的技术要求为：氮碳共渗层深度 $\geq 0.05\text{mm}$ ，白亮层深度在 0.006mm 以上，表面硬度在 850HV0.2 以上，基体硬度 $\geq 43\text{HRC}$ ，挺杆的氮碳共渗工艺流程参见气门氮碳共渗部分的内容。

图 3-39 所示为气门挺杆的液体氮碳共渗工艺曲线，图 3-40 所示为气门挺杆的金相照片，实际测出氮碳共渗层深度为 0.06mm，硬度在 900HV0.2 以上，符合技

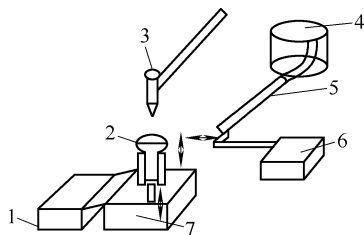


图 3-38 挺杆的火焰自动淬火设备示意图

- 1—油槽 2—挺杆 3—乙炔加热喷嘴
4—振动料斗 5—排料槽 6—送料机构
7—旋转打料装置

术要求。从图中可看出白亮层十分明显，因此表面的硬度较高，达到了挺杆表面强化的目的。

图 3-41 所示为 Cr12W 钢制挺杆工作面的氮碳共渗腐蚀缺陷，其是由渗氮盐腐蚀产生的，而花斑则为盐渣沉积在工作面上所致，图 3-42 所示为 Cr12W 钢制挺杆工作面的抛丸花斑，这是抛丸前表面有水造成的，图 3-43 所示为 Cr12W 钢制挺杆工作面的剥落情况，是氧化后激冷所致。

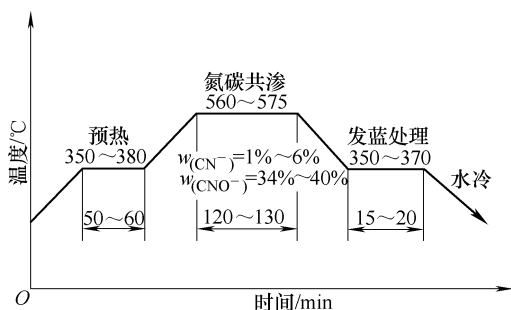


图 3-39 气门挺杆液体氮碳共渗工艺曲线

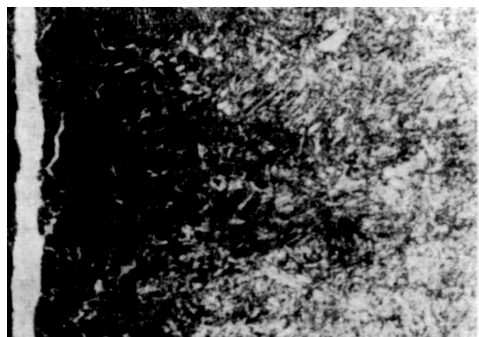


图 3-40 气门挺杆氮碳共渗后的金相组织 (×600)



图 3-41 Cr12W 钢制挺杆工作面的氮碳共渗腐蚀缺陷

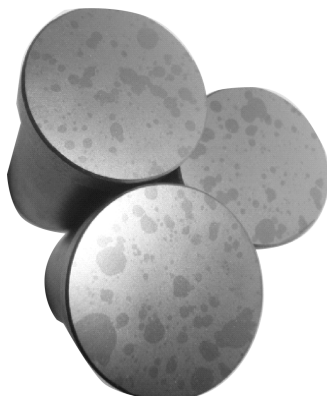


图 3-42 Cr12W 钢制挺杆工作面的抛丸花斑

Cr12W 钢制挺杆氮碳共渗后开裂。钢制气门挺杆是采用 Cr12W 钢制造的，其工艺流程为下料→加热→热挤压→球化退火→车加工→磨加工→钻孔→淬火→高温回火→空冷→磨削加工→磁粉无损检测→氮碳共渗→发蓝处理→清洗→抛丸→防锈→磨外圆→研磨球窝→检验→刻字→包装等，在成品检验时发现有部分挺杆出现端面裂纹，甚至为通裂，沿着出油孔开裂，如图 3-44 与图 3-45 所示。钢制挺杆

的热处理要求为基体硬度 $\geq 43\text{HRC}$ ，氮碳共渗层深度 $\geq 0.033\text{mm}$ ，表面硬度在 $850\text{HV}0.2$ 以上，脆性小于2级。

从挺杆裂纹的形态分析，其在氮碳共渗前进行磁粉无损检测，由于 $\text{Cr}12\text{W}$ 钢为高合金钢，回火后采用空冷，故排除了热处理过程中出现裂纹的可能性，液体氮碳共渗处理的流程为串筐→清洗→预热→氮碳共渗→发蓝处理→清洗→抛丸→防锈。氮碳共渗后进行发蓝处理，有效减小了内外温差，避免因冷却过于激烈而导致开裂，经过检验得知，图3-45中裂纹处的白色物质为氮碳基盐与氧化盐，进行金相分析未发现裂纹处有氧化脱碳现象，也未发现有氮碳共渗层存在。

大部分挺杆开裂时是穿过出油孔的，表明此处流动性强，散热快，冷却十分激烈，而工作面底部的厚度比壁厚大得多，故内外热应力大。挺杆发蓝处理后的清洗水温为 $40\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，采用的氮碳共渗工艺装备如图3-46所示，挺杆紧密排列在一起，从氧化炉提出后的挺杆表面温度为 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，停留一段时间后进行清洗，由于筐边缘的挺杆温度低，而筐心（中间）部分的挺杆仍会有较高的温度，故在清洗时温差较大，产生大的热应力导致开裂。

针对此问题，可采取的措施为：发蓝处理后的挺杆放置到室温后清洗；提高生产率，改进氮碳共渗工艺装备，采用可抽拉式的，将发蓝处理后的挺杆网板取出空冷，可避免挺杆冷却不当而产生的裂纹缺陷。



图 3-43 $\text{Cr}12\text{W}$ 钢制挺杆工作面的剥落情况

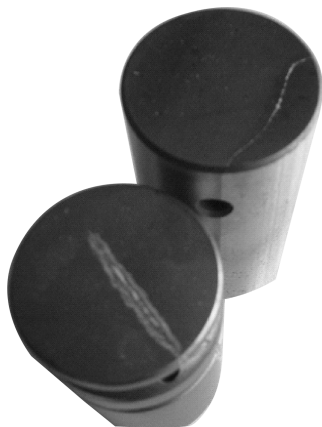


图 3-44 $\text{Cr}12\text{W}$ 钢制挺杆抛丸后的裂纹（毛坯）



图 3-45 $\text{Cr}12\text{W}$ 钢制挺杆的端面裂纹（成品）

2) 挺杆的磷化处理。挺杆的磷化处理是在某些酸性磷酸盐为主的溶液中进行的，是使挺杆表面发生沉积，形成一层不溶于水的结晶磷酸盐转化膜的过程。磷化膜是由一系列大小不等的晶粒组成的，形成有许多细小裂缝的多孔结构，可以使挺杆表面的耐磨性、减摩性和吸附性得到较好的改善。处理后磷化膜的厚度为 1 ~ 50 μ m，基体的硬度和磁性等均保持不变。

磷化的工艺流程为：化学脱脂→热水洗→冷水冲洗→酸洗→冷水冲洗→磷化处理→冷水冲洗→去离子水洗→干燥。为了确保磷化膜的结晶致密、细小，满足挺杆表面耐磨性、耐蚀性等的要求，在磷化前增加表面调整工序，通常用钛盐溶液作调整剂。在实际生产过程中，化学脱脂溶液的配方为氢氧化钠 60 ~ 100g/L、碳酸钠 30 ~ 60g/L、磷酸三钠 40 ~ 50g/L、水玻璃 10 ~ 20g/L，溶液的温度为 90 ~ 100℃，时间为 10 ~ 15min。然后使用 8080 清洗剂，所配体积分数为 10%，温度为 30 ~ 60℃，时间为 10 ~ 15min。酸洗采用 18% ~ 24% 的盐酸，温度为 50 ~ 70℃，时间为 5 ~ 10min 即可。

挺杆的磷化通常采用中温磷化工艺，温度为 50 ~ 70℃，溶液中游离酸度与总酸度比值为 1: (10 ~ 15)，时间为 5 ~ 15min。此时游离酸度比较稳定，具有时间短、生产率高、磷化膜稳定和耐蚀性高等特点，常用中温磷化处理的溶液成分和工艺条件见表 3-41。需要说明的是配方 1 ~ 4 为常用的磷化配方，配方 5 为合金铸铁耐腐防锈磷化工艺，配方 6 为高磷灰铸铁磷化配方，配方 7 为 45 钢用配方，配方 8 为激光热处理前的预磷化处理配方。

表 3-41 常用中温磷化处理的溶液成分和工艺条件

配方编号		1	2	3	4	5	6	7	8
溶液中各成分浓度 / (g/L)	磷酸锰铁盐 (马日夫盐)	30 ~ 35		30 ~ 45	30 ~ 35				25 ~ 30
	磷酸二氢锌		30 ~ 40						
	硝酸锌	80 ~ 100	80 ~ 100	100 ~ 130	80 ~ 100	NaNO ₂ 0.3	36 ~ 40	36 ~ 40	80 ~ 90
	磷酸					35 ~ 45	25	25	10 ~ 15
	硝酸锰			20 ~ 30		MnCO ₃ 10 ~ 20	MnCO ₃ 8	MnCO ₃ 8	MnCO ₃ 3 ~ 5



图 3-46 挺杆氮碳共渗工艺装备简图

(续)

配方编号		1	2	3	4	5	6	7	8
工 艺 条 件	游离酸度/点	5~7	5~7.5	6~9	5~7	8~10	7~9	11.7	8~11
	总酸度/点	50~80	60~80	85~110	50~70	90~95	80~95	88.1	80~100
	处理温度/℃	50~70	60~70	55~70	60~70	75	63~65	74	65~75
	处理时间/min	10~15	10~15	10~15	10~15	12	3~5	10	13

磷化后的处理完全取决于产品的用途,通常磷化膜后处理溶液的成分及工艺条件见表 3-42。

表 3-42 磷化膜后处理溶液的成分及工艺条件

配方编号		1	2	3	4	5
溶 液 中 各 成 分 浓 度/ (g/L)	重铬酸钾	60~80	50~80			
	铬酐			1~3		
	碳酸钠	4~6				
	肥皂				30~35	
	锭子油或防锈油					100%
处理温度/℃		80~85	70~80	70~95	80~90	105~110
时间/min		5~10	8~12	3~6	3~5	5~10

挺杆磷化膜的质量检验分为外观检验、耐蚀性检验和厚度与质量检验等几项,外观上应为连续、均匀且致密的晶体结构,表面呈灰色或灰黑色,表面不应有未磷化的残余空白或锈迹。耐蚀性检验可用浸入法、点滴法等,浸入法是将磷化后的样板浸入 3% 的氯化钠溶液中 2h 后取出,表面无锈蚀为合格;点滴法是将按要求配好的试剂滴在磷化膜上,观察其变色的时间,厚磷化膜、中等厚度磷化膜和薄磷化膜的时间分别为 5min、2min 和大于 1min 时,视为合格。厚度可用非磁性测厚仪检验,也可切片测磷化层厚度。质量测量是通过测量磷化膜剥离前后样品的质量实现的(用于精密产品)。

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 15Cr、20、20Cr 等材料的挺杆渗碳过程与普通的渗碳无大的区别,其渗碳层的深度以试样来进行间接检测,不允许出现网状或块状的碳化物、表面到内部渗碳层的浓度梯度过陡等情况,该类缺陷将造成热处理后挺杆表面掉块、耐磨性差

等, 导致使用寿命明显降低。

2) 渗碳钢经渗碳或碳氮共渗热处理后的金相组织为细针状马氏体, 不允许有网状游离渗碳体和游离状态的铁素体, 从渗层至中心不能有骤然转变的金相组织。挺杆心部为低碳马氏体组织。

3) 合金钢和合金铸铁淬火后均获得了高的硬度, 需要注意的是合金铸铁(含冷激铸铁)的热处理淬火温度为 $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$, 保温时间的长短将对硬度有直接的影响, 在盐浴炉中的保温时间超过 15min 时, 碳化物分解, 淬火后的硬度无法满足技术要求, 而时间过短则无法消除白口组织。热处理检查内容有硬度、石墨数量(体积分数 $<10\%$)以及碳化物的数量(体积分数 $>30\%$)。

4) 挺杆火焰淬火时, 应关注设备各部件、流量计及压力表运转是否正常, 挺杆中心与火焰喷嘴的同轴度应小于 1mm , 端面与喷嘴的垂直度应小于 1mm , 喷嘴距离加热表面的距离应为 50mm 左右, 乙炔、氧气的流量与压力应符合工艺要求, 淬火油温应控制在 $40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围。

5) 挺杆的表面处理主要包括氮碳共渗和磷化, 其中氮碳共渗多应用于高合金钢和合金铸铁等材料, 它们的回火温度均高于氮碳共渗温度, 共渗层深度大多在 0.03mm 以上, 硬度在 850HV 以上, 质量缺陷多为表面粗糙度超差(腐蚀)、硬度低以及清洁度低等。

6) 钢制挺杆氮碳共渗后表面缺陷有腐蚀、花斑等, 故应防止渗氮时间过长, 应彻底渗氮盐以及加强过程清洗等, 避免表面存有残盐以及水痕迹等。

7) 需要注意的是 20 钢、 25 钢挺杆的反挤压过程中, 如果未进行退火处理, 毛坯硬度在 121HBW 以上, 则容易引起挤压时变形困难, 将导致挤压凸模断裂。图3-47所示为一支挺杆毛坯未进行退火处理, 出现凸模断裂的实物图片。



图 3-47 20 钢反挤压挺杆与挤压凸模的断裂图片

a) 凸模断在挤压挺杆中 b) 凸模的断口

8) 挺杆热处理质量检验。渗碳钢挺杆的热处理质量检验与合金铸铁的热处理质量检验分别见表3-43和表3-44。

表 3-43 渗碳钢挺杆的热处理质量检验

检 验 项 目		检 验 方 法	检 验 要 求
表面质量		观察	无裂纹、刻痕、皱纹、碰伤和氧化皮等
渗碳层深度		渗碳层包括过共析层 + 共析层 + 1/2 过渡层, 测量渗碳淬火有效硬化层深度时应按 GB/T9450—2005 的规定	按图样要求执行
硬度		10% 锉刀检查, 2% 硬度计检查	按图样要求执行
显微组织	表层	金相显微镜观察	细针状马氏体 + 碳化物, 断续状或连续网状碳化物深度 < 0.14mm。表面硬度合格时, 允许有少量的残留奥氏体
	心部		板条马氏体 + 铁素体

表 3-44 合金铸铁挺杆的热处理质量检验

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求
硬度	在端面测定, 至少三点	58 ~ 65HRC (淬火后)
显微组织	每炉最少取一个试样进行金相组织检验	① 热处理后不允许有脱碳、氧化和石墨生长现象 ② 基体组织为细马氏体 ③ 石墨与碳化物分布应符合铸态显微组织检验要求 ④ 在距端面 2.5 ~ 8.5mm 范围内允许出现 6 级碳化物

6. 挺杆的热处理、磷化缺陷分析与预防或补救措施

挺杆的热处理时常见缺陷的产生原因和预防或补救措施见表 3-45。挺杆磷化时常见缺陷的产生原因和预防或补救措施见表 3-46。

表 3-45 挺杆热处理时常见缺陷的产生原因和预防或补救措施

材 料 类 型	缺 陷 名 称	产 生 原 因	预 防 或 补 救 措 施
渗碳钢	渗碳层不均匀	① 炉内气氛流动不畅 ② 炉子密封性差 ③ 零件未清洗干净 ④ 零件有堆积或叠压	① 合理摆放, 确保炉气流动正常 ② 检查炉盖的密封性 ③ 除去零件表面的油污、锈迹和氧化皮等 ④ 确保零件之间留有一定的间隙
	过热	① 加热温度偏高 ② 保温时间长	① 严格按照规定操作 ② 850 ~ 890℃ 正火后重新淬火

(续)

材料类型	缺陷名称	产生原因	预防或补救措施
渗碳钢	渗碳层浓度低或高	① 渗碳温度低 ② 炉内碳势过高 ③ 渗碳扩散时间短	① 严格执行渗碳工艺温度，使碳势符合要求 ② 900 ~ 910℃ 扩散正火后重新加热淬火
	表面脱碳	① 炉气碳势低或温度低 ② 盐浴脱氧不良 ③ 渗碳后冷却时间过长	① 通气提高炉内碳势 ② 在脱氧彻底的盐浴炉或可控气氛炉内加热 ③ 出炉后散放快冷
	软点	淬火温度偏低	重新退火后淬火处理
镍铬钼合金铸铁	表面脱碳	① 加热温度高 ② 炉气内碳含量低	① 在盐浴炉或可控气氛炉内加热 ② 去除脱碳层后重新加热
	过热	加热温度高	严格控制淬火温度，过热严重者无法补救
	硬度低	① 加热温度低 ② 保温时间短	允许重新加热淬火
	过烧	① 加热温度过高 ② 保温时间过长	① 严格控制温度 ② 采用合理的保温时间
	淬火软点、软带	① 淬火时油温过高 ② 加热温度低 ③ 零件表面太脏 ④ 油的冷却能力差	① 加油循环系统，降低油的温度 ② 提高加热温度 ③ 保持零件表面的清洁 ④ 提高油的冷却能力

表 3-46 挺杆磷化时常见缺陷的产生原因和预防或补救措施

序 号	缺陷名称	产生原因	预防或补救措施
1	表面不能形成磷化膜	① 零件表面有硬化层 ② 溶液中硫酸根含量高 ③ 磷化液中存在杂质 ④ 五氧化二磷含量过低	① 强酸腐蚀 ② 加入碳酸钡中和硫酸根 ③ 更换磷化液 ④ 添加磷酸盐
2	磷化膜有空白处	① 硝酸根含量过低 ② 五氧化二磷含量过低 ③ 温度过低 ④ 硫酸亚铁盐增多	① 添加硝酸锌 ② 补充磷酸盐 ③ 升高溶液的温度 ④ 更换硫酸溶液
3	表面有黄白色沉淀物	① 溶液中有沉淀物 ② 硝酸根不足 ③ 磷化液中没有冲洗剂	① 清理槽中的沉淀物 ② 补充硝酸锌 ③ 在酸溶液中去磷化膜，重新磷化

(续)

序 号	缺 陷 名 称	产 生 原 因	预 防 或 补 救 措 施
4	磷化膜耐蚀性降低和生锈	① 磷化膜结晶粗大或过细 ② 挺杆表面有残酸 ③ 反复磷化 ④ 游离酸度过高 ⑤ 磷化液磷酸盐含量低	① 调整游离酸度与总酸度的比值 ② 加强中和并水洗 ③ 控制磷化次数 ④ 补充硝酸锌 ⑤ 添加磷酸盐
5	磷化膜薄, 结晶过细	① 磷化时间短 ② 亚铁离子含量过低 ③ 总酸度过高 ④ 表面有硬化层 ⑤ 温度过低	① 延长磷化时间 ② 补充磷酸二氢铁 ③ 加水稀释或添加磷酸盐, 调整好酸的比值 ④ 用强酸腐蚀表面或喷砂 ⑤ 提高溶液的温度
6	磷化膜结晶粗大	① 亚铁离子含量过多 ② 表面有残酸 ③ 溶液中硝酸根含量不足 ④ 溶液中硫酸根含量增高 ⑤ 表面出现过腐蚀	① 用压缩空气搅拌或用过氧化氢降低铁的含量, 升高温度 ② 加强中和或水洗 ③ 添加硝酸锌 ④ 用碳酸钡处理硫酸根 ⑤ 控制酸的浓度和处理时间
7	磷化层有花斑	① 除油不净, 磷化温度低 ② 表面有钝化层	① 加强除油效果, 调整温度 ② 增强酸洗效果 ③ 调整酸的浓度使表面呈金属状态
8	磷化膜发红, 耐蚀性下降	① 酸洗溶液中的铁屑附在表面 ② 铜离子渗入磷化液	① 更换酸洗溶液 ② 禁止使用铜挂具
9	磷化膜经冷挤后漏钢处, 挂黑迹	① 表面存在半磷化的颗粒状态 ② 挺杆之间的氧化皮没有酸洗干净	① 用加热法清洗零件的表面 ② 加强酸洗, 摆动吊篮, 将间隙处的氧化皮洗掉
10	冷挤压后磷化膜产生条状剥落	① 肥皂水中有杂质存在 ② 皂化前表面有杂质和沉淀物	① 清理或更换肥皂溶液 ② 在酸中除掉磷化膜, 重新进行磷化处理

3.3.3 推杆、摇臂和摇臂轴

1. 内燃机推杆

(1) 工作条件与技术要求 推杆是与挺杆有直接关系的零件, 它由杆身、上端头和下端头组成, 下端头呈球状, 在装配时与挺杆内的凹球面配合, 上端头呈凹

坑状，与摇臂上调整螺钉下端的球面相配合，因此推杆的作用是将凸轮轴经过挺杆传来的推力传给摇臂，是传递动力的关键部件，是气门机构中最容易弯曲的零件，因此推杆的两端面应具有高的硬度、刚度和良好的耐磨性，用钢或硬铝制作，钢制推杆应经过淬火和磨光，以保证其有足够的耐磨性。

(2) 材料的选用和热处理工艺 整体结构钢制气门推杆用45钢，组合气门推杆两端头材质为20钢、45钢，球头和球面经渗碳淬火后硬度符合要求，45钢渗碳层深度大于1mm，硬度 $\geq 58\text{HRC}$ ，20钢渗碳层深度大于0.8mm，硬度 $\geq 52\text{HRC}$ 。为了减轻质量，常做成空心结构，但必须保证有足够的刚度。

组合气门推杆的头部不允许松动，焊缝要牢固，要求表面无裂纹、飞边、毛刺、锈蚀等。

2. 汽车发动机的摇臂和摇臂轴

(1) 摇臂 摇臂为一不等臂的杠杆件，也称为双杠杆，摇臂和摇臂轴如图3-48所示，摇臂中间的圆孔用来装摇臂轴。长臂端部与气门的杆端接触，短臂端部的螺孔用来安装调整螺钉，摇臂孔内有润滑油孔。摇臂的作用是把推杆经调整螺钉传给它的力改变方向传给气门端部，使气门打开进行工作。常采用钢或球墨铸铁制造摇臂，为了提高圆弧的耐磨性，提高其使用寿命，通常在感应淬火处理后进行工作面的磨削，如果存在磨削参数不当或零件定位尺寸不准等因素，则时常会产生磨削裂纹，具体如图3-49所示，在裂纹处可看到因磨削而造成的二次淬火的白亮层等。摇臂安装在摇臂轴上。目前气门摇臂的摇臂体采用铝合金材料，摇臂头部即摇臂镶块为合金材料，与传统的铸钢摇臂相比，提高了刚度，又减轻了运动部分的质量，降低了惯性力，减少了磨损，故延长了使用寿命。

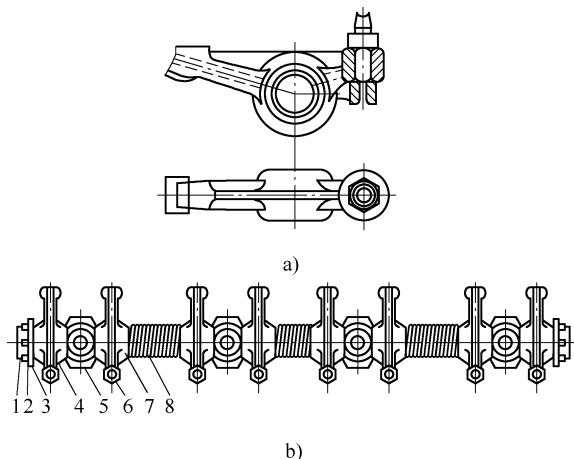


图3-48 摇臂和摇臂轴

1—开口销 2—弹簧圈 3—垫片 4—摇臂
5—支座 6—调整螺钉 7—摇臂轴 8—弹簧

(2) 摇臂轴 汽车发动机摇臂轴及淬火区如图 3-50 所示, 采用中空的 45 钢管制造, 最佳碳质量分数为 0.42% ~ 0.47%, 45 钢毛坯预先调质硬度为 207 ~ 247HBW, 有 6 处需要表面淬火处理, 硬度为 58 ~ 63HRC, 硬化层深度为 1 ~ 1.5mm。



图 3-49 摇臂磨削裂纹及附近区域的金相组织 ($\times 100$)

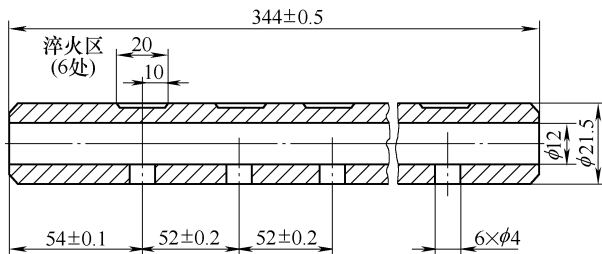


图 3-50 汽车发动机摇臂轴及淬火区

45 钢属于中碳钢, 如果要求采用整体淬火 + 低温回火处理, 硬度为 50 ~ 55HRC, 则采用的热处理工艺为 $820 \sim 850^{\circ}\text{C} \times 7 \sim 8\text{min}$ (中温盐浴炉), 淬火冷却介质为 20°C 以下的 10% 的氯化钠水溶液, $200 \sim 240^{\circ}\text{C} \times 60 \sim 90\text{min}$ (硝酸盐浴中) 回火。

3.3.4 曲轴链轮和链条

1. 工作条件和技术要求

曲轴链轮和链条为动力传动机构, 要求其自重轻、阻力小、安全性高。链轮的运转速度快, 变换频繁, 因此所受冲击力大, 同时要承受弯曲应力、表面接触应力等作用, 应具有高的硬度和耐磨性。链条由外链板、中间链板、内链板、销轴、衬套和滚子组成, 其中链板要承受交变的法向拉应力和弯曲应力的作用, 并承受多次的冲击载荷等, 而滚子在链传动时, 也承受很大的交变挤压力和多次冲击力的作用, 另外销轴同样要承受周期性的冲击弯曲载荷。链条的失效的形式为碎裂、过载损坏、磨损和疲劳 (或脆性) 断裂等。

2. 材料的选用

根据链条的工作特点, 要求其表面具有良好的韧性和足够的耐磨性来保证其具有高的使用寿命, 同时又必须具有足够的强度, 通常链条零件如链板 (片)、销轴、滚子和衬套等采用低碳钢经碳氮共渗处理或采用低碳合金钢进行低碳马氏体处理, 也可用中碳优质低合金钢进行淬火、中温回火处理。

链板材料选用 35CrMo、42CrMo、40Cr、30CrNi3 等; 滚子的材料为 20CrMo; 销轴材料为 20CrMnMo、20Cr2Ni4 等。这些材料经过热处理或化学热处理后能获得要求的力学性能, 满足工作需要, 并确保具有高的使用寿命。

3. 链条零件的热处理

(1) 链板 (片) 的热处理 链板 (片) 材料为中碳合金钢 35CrMo、42CrMo、40Cr、40Mn、30CrNi3 和低碳钢 27SiMn、20Mn2, 低碳钢经淬火后获得低碳马氏体, 其淬火工艺如图 3-51 所示, 35CrMo、42CrMo、40Cr、40Mn、30CrNi3 中碳合金钢制链板的热处理工艺如图 3-52 所示。

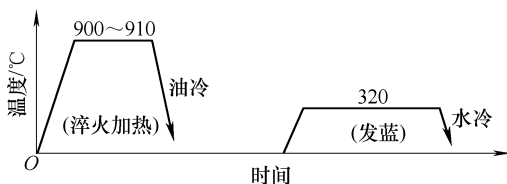


图 3-51 27SiMn、20Mn2 链板的热处理工艺

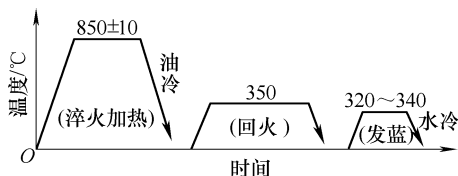


图 3-52 中碳合金钢等链板的热处理工艺

40Mn 链片处理后的硬度为 35 ~ 45HRC。而 35CrMo 的热处理硬度为 42 ~ 47HRC, 42CrMo 硬度为 38 ~ 45HRC。

(2) 销轴、滚子和衬套的热处理 部分低碳钢曲轴链条零件销轴、滚子和衬套碳氮共渗热处理的技术要求见表 3-47。

表 3-47 部分低碳钢曲轴链条零件销轴、滚子和衬套碳氮共渗热处理的技术要求

零件名称	材 料	渗层深度 /mm	表面硬度 HRA	显 微 组 织	冲 击 韧 度
销轴	Q195 20CrMnMo	0.2 ~ 0.3	72 ~ 82	表层: 针状马氏体 + 少量残留奥氏体 心部: 低碳马氏体 + 铁素体	冲击变形碎裂, 碎片无尖角
滚子	Q195	0.15 ~ 0.25	62 ~ 72		
衬套	08F Q195	0.1 ~ 0.2	64 ~ 74		

用 20CrMo 钢制作的滚子淬火后获得低碳马氏体组织, 经 180 ~ 220℃ 回火后, 明显提高了使用寿命。销轴用材料和热处理后的技术要求见表 3-48。

表 3-48 销轴用材料和热处理后的技术要求

材 料	热处理工艺	技 术 要 求			具 体 用 途
		层深 /mm	表面硬度 (HRA)	心部硬度 HRC	
20CrMnMo	渗碳淬火、低温回火	0.45 ~ 0.70	78 ~ 82	34 ~ 38	一般载荷
20Cr2Ni4	碳氮共渗淬火、回火	0.45 ~ 0.70	78 ~ 82	34 ~ 38	重载荷

通过分析链条的工作状况可知, 这些零件既要有良好的耐磨性, 又要具有一定的强度和韧性, 因此选用低碳钢进行渗碳或碳氮共渗处理, 最后低温回火, 这样表面可获得高的硬度, 而零件心部硬度低, 以满足其工作需要, 避免在运动过程中出现断裂的现象。

曲轴链条的销轴、滚子和衬套的气体碳氮共渗工艺如图 3-53 所示。

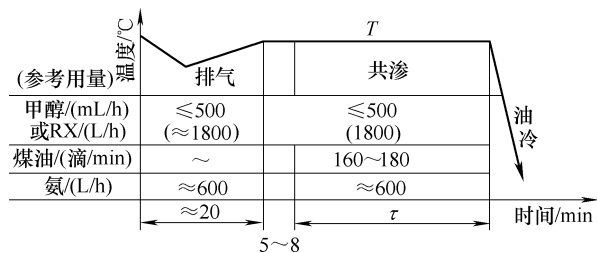


图 3-53 曲轴链条的销轴、滚子和衬套的气体碳氮共渗工艺

通常选用网带式碳氮共渗炉或滚筒式渗碳炉，零件的碳氮共渗采用滴注方式，渗剂主要有煤油和甲醇，其中甲醇为稀释剂。资料介绍，采用 RX 气体进行碳氮共渗效果更好。

为了提高链板、滚子和销轴的寿命，必须进行喷丸强化处理，处理后可明显提高零件的疲劳抗力和多冲抗力。

3.4 柴油机针阀体的热处理

1. 工作条件和技术要求

喷油器柱塞偶件由柱塞与柱塞套组成，而喷油器偶件由针阀体和针阀组成，它们属于柴油机上的精密偶件，要求尺寸配合精度高、稳定性好。在工作过程中，针阀相对于针阀体作高速滑动，孔和座受到反复的摩擦和冲击作用，油槽与高压油孔也承受很高的油压作用（达 900MPa）。加上喷油器处在燃烧室的顶部，头部要承受较高的温度。从工作性质来看，其损坏的形式为磨粒磨损使间隙超差，失去原有的精度。

2. 材料的选用

根据针阀体和柱塞偶件的工作特点，要求其具有高的硬度和耐磨性、良好的尺寸稳定性，能耐热和抗接触疲劳，同时要有一定的耐蚀性和耐回火性。在材料的选用上除考虑上述工作条件外，还要求热处理畸变量小，因此一般选用 GCr15 钢、18Cr2Ni4WA 钢，经热处理后可得到高的硬度和稳定的尺寸，GCr15 钢广泛用于柱塞偶件和中、小功率柴油机的针阀偶件，大功率的使用 W18Cr4V 等高速工具钢和 18Cr2Ni4WA 钢制作针阀体。大功率柴油机的针阀体采用淬透性高的 GCr15SiMn 钢制造，而大功率高速柴油机和机车柴油机选用 25SiMn2MoV、37SiMn2MoV 等钢渗碳后热处理来制作针阀体，达到要求的力学性能。针阀体的形状比较复杂，采用低碳合金结构钢制造时只需进行渗碳处理。

3. 柴油机针阀体的热处理工艺

(1) 常用材料的技术要求 油泵油嘴偶件常用材料与技术要求见表 3-49。

表 3-49 油泵油嘴偶件常用材料与技术要求

材 料	技 术 要 求	
	热处理路线和工艺方法	硬度 (HRC)
GCr15	淬火、深冷处理、回火和稳定化处理	62 ~ 65
GCr15SiMn	正火、球化退火、机械加工、去应力退火、淬火、深冷处理、回火、稳定化处理	62 ~ 65
CrWMn	淬火、深冷处理、回火、稳定化处理	62 ~ 65
W18Cr4V	球化退火、机械加工、去应力退火、淬火、回火、稳定化处理	62 ~ 66
W6Mo5Cr4V2	退火、机械加工、去应力退火、淬火、回火、稳定化处理	62 ~ 66
18Cr2NiWA	淬火、深冷处理、稳定化处理	≥58HRC
25SiMn2MoV	渗碳、淬火、深冷处理、回火、稳定化处理	≥58HRC
37SiMn2MoV	渗碳 (层深 0.50 ~ 0.90mm)、淬火、回火、稳定化处理	58 ~ 62

另外新型材料 20CrMoS 用于重型载货汽车发动机喷油器偶件, 其呈冷拉退火态供货, 显微组织为 F + P, 硬度为 179 ~ 239HBW, 其各项性能均优于 18Cr2NiWA。

(2) 油泵柱塞副和喷油偶件的热处理 油泵柱塞副和喷油偶件使用的材料不同, 采用的热处理工艺不同。机械加工工艺流程为热轧退火→切料→机械加工→热处理→精加工→稳定化处理→成品。

1) GCr15 钢的热处理技术要求为硬度 62 ~ 65HRC, 马氏体级别小于 3 级。热处理流程为淬火加热→油中冷却→冰冷处理→回火→两次时效处理。工艺参数为 840 ~ 860℃ 盐浴加热, 在 160 ~ 170℃ 的硝酸盐中分级冷却, 在 -60 ~ -70℃ 温度下冷处理 30 ~ 40min, 工件升到室温后放入 150 ~ 170℃ 温度下, 回火 2 ~ 4h, 随后在 130℃ 温度时效两次, 每次 4 ~ 6h。低温回火可使淬火马氏体转变为回火马氏体, 残留奥氏体发生转变, 起到减小淬火应力和保持尺寸稳定的作用。GCr15 柱塞副和针阀体的热处理工艺如图 3-54 所示。

采用冷处理的目的是减少残留奥氏体的数量, 稳定组织尺寸。淬火温度不能过高, 否则会使 M_s 点明显下降, 造成残留奥氏体的数量增多, 为了减少畸变, 可在 150 ~ 180℃ 进行分级淬火。马氏体分级淬火工艺曲线如图 3-55 所示。在热处理过程中需要注意以下几点。

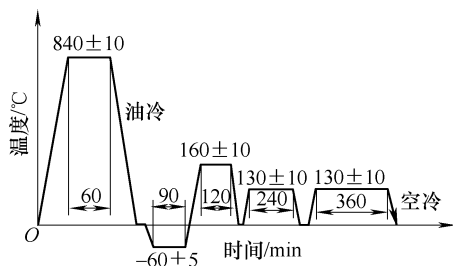


图 3-54 GCr15 柱塞副和针阀体的热处理工艺

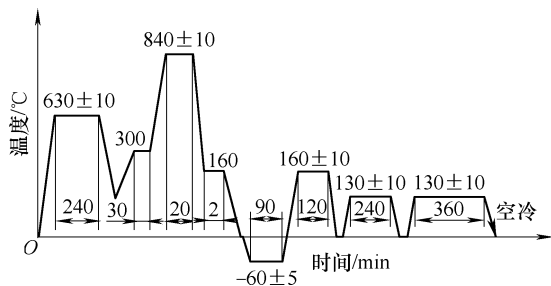


图 3-55 马氏体分级淬火工艺曲线

① 分级温度和时间。温度低于 150°C 将提高残留奥氏体的数量，使冰冷的效果降低；保持时间应依据零件的大小而定，一般为 $2 \sim 5\text{min}$ ，原则是确保内外温度一致，时间过长又会造成残留奥氏体的数量增多，在钢的 M_s 点盐浴中冷却零件的截面十分均匀地形成马氏体组织，因此不会形成过大的残留应力。分级淬火的特点是减轻零件开裂的倾向，零件的畸变和残留应力小，有利于提高零件的内在质量，需要注意分级淬火的温度、保温时间以及从淬火槽中取出的工艺流程，这些对残留奥氏体数量有直接的影响，如图 3-56 所示。

② 分级后的冷却。资料介绍冷却方式对残留奥氏体的数量有很直接的影响，分级后可采用水冷、油冷或空冷，只有快速的水冷才能最大限度地减少残留奥氏体的数量。

③ 如采用淬火油冷，则应严格控制淬火油温和停留时间，如油温过高或时间过短，零件未能冷透将使内部残留奥氏体的数量增多，会造成硬度不足或尺寸的不稳定，影响零件的热处理质量。

2) GCr15SiMn 钢的热处理技术要求为硬度达到 $62 \sim 65\text{HRC}$ 。其热处理工艺如下：较大功率的柴油机的针阀体采用 GCr15SiMn 钢制造，图 3-57 所示为它的外形尺寸。但采用 GCr15 钢的热处理工艺处理的工件，其寿命仅为几十个小时，在实际生产中采用真空油淬热处理，寿命提高到 2000h 以上。

在真空炉内 $830 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 加热，保温 60min ，冲入高纯氮气（ 99.999% 以上）到炉压 40kPa 入油冷却，其工艺曲线如图 3-58 所示。

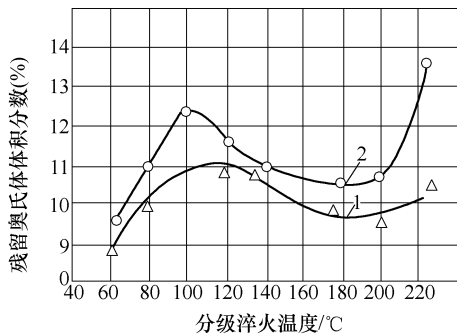


图 3-56 分级淬火温度和时间对 GCr15 残留奥氏体数量的影响

1— 850°C 分级淬火保持 5min 2— 850°C 分级淬火保持 3min

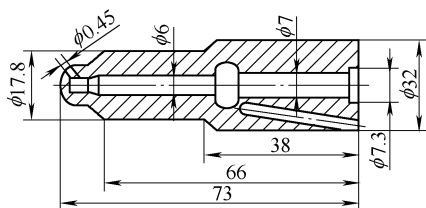


图 3-57 较大功率柴油机针阀

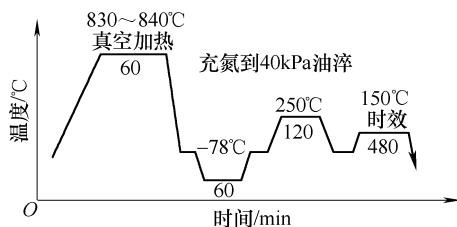


图 3-58 GCr15SiMn 钢针阀体真空热处理工艺曲线

3) 25SiMnMoVA 钢的热处理技术要求为硬度 62 ~ 65HRC。工艺流程为渗碳→淬火→回火。渗碳在强碳势的渗碳剂中进行, 一般采用中孔堵塞的固体渗碳处理, 也可采用煤油和甲醇进行气体渗碳。采用 820 ~ 830℃ 或中孔堵塞的 860 ~ 880℃ 气体渗碳工艺。采用 CO_2 红外仪或氧探头控制炉内气氛的方法, 可确保渗碳质量, 目前国内外已经推广真空渗碳工艺, 其具有渗碳质量好、工件变形小、环境无污染、生产方便、使用寿命长、劳动条件好等优点, 因此具有良好的经济效益和社会效益。

第一种热处理工艺为 920℃ 渗碳保温结束后油冷, 于 240 ~ 280℃ 的油炉或硝盐炉中回火。第二种工艺为 910℃ 加热在 280℃ 的硝盐炉中分级冷却, 约 10 ~ 20min 转油冷。回火在 260 ~ 280℃ 的温度下进行。第二种工艺可获得最佳的冲击韧度, 寿命得到大幅度提高。

(3) 18Cr2Ni4WA 钢针阀体的热处理工艺 其技术要求为硬度 62 ~ 66HRC。基本工艺流程为渗碳→随罐空冷→冷处理→低温时效。另外也可采用渗碳→高温回火→淬火→冰冷处理→四次回火的工艺流程。

固体渗碳后随罐空冷进行冰冷处理的工艺如图 3-59 所示, 热处理后的硬度大于 58HRC。渗碳后重新加热的热处理工艺如图 3-60 所示。

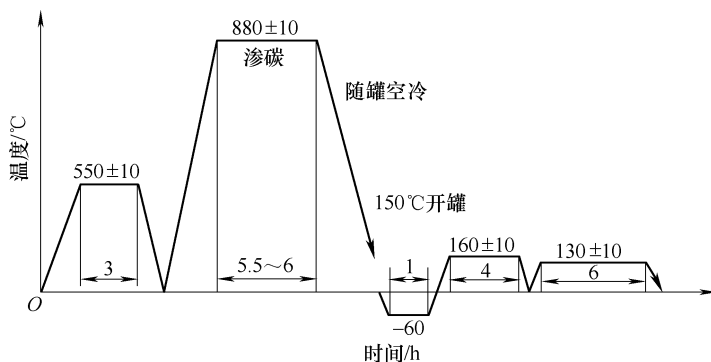


图 3-59 18Cr2Ni4WA 钢针阀体固体渗碳后随罐空冷进行冰冷处理的工艺

(4) W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 钢针阀体的热处理工艺 两针阀体的热处理工艺曲线分别如图 3-61 和图 3-62 所示, 热处理后的硬度为 62 ~ 66HRC, 变形小, 内孔无堵塞。如有条件最好在真空炉中淬火, 这样可实现零件的无氧化加热, 事实证明可明显提高其使用寿命。

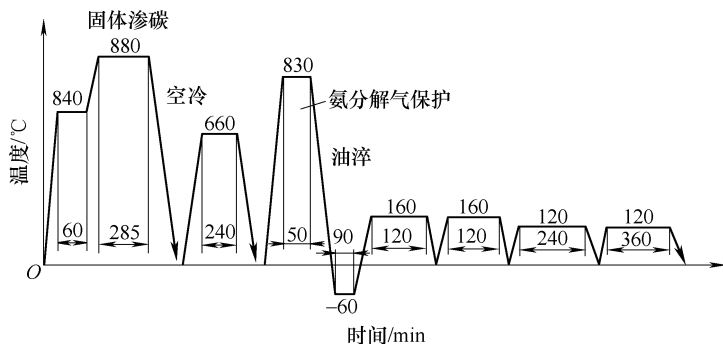


图 3-60 18Cr2Ni4WA 钢针阀体渗碳后重新加热的热处理工艺

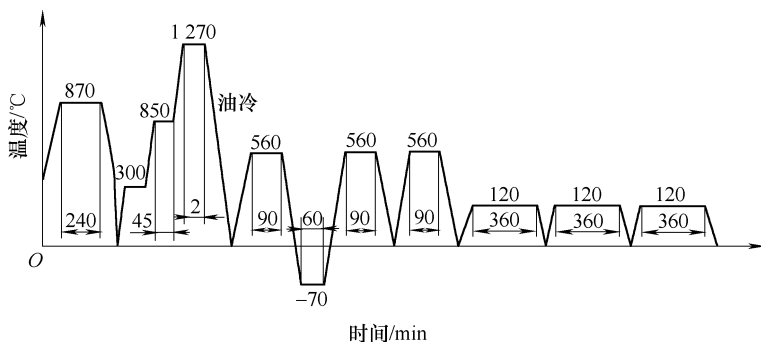


图 3-61 W18Cr4V 钢针阀体的热处理工艺曲线

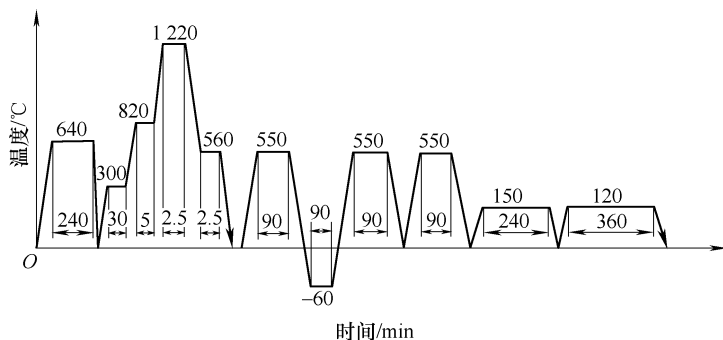


图 3-62 W6Mo5Cr4V2 钢制针阀体的热处理工艺曲线

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 针阀体淬火分为分级淬火和普通淬火两种, 目前国内外多数企业对偶件的加热是在盐浴炉中进行的, 其存在下列问题: 在盐浴加热过程中脱氧不及时, 或渣不彻底, 往往会造成表面脱碳, 或有贫碳现象, 影响使用寿命; 盐浴淬火后工件表面存积残盐, 清洗十分困难, 必须采用热水清洗。针对以上两点, 尤其是对于细小喷孔, 容易被残盐堵塞, 采用氨基保护气氛完成对工件的加热比较合理, 另外对高速工具钢和轴承钢采用真空淬火, 提高零件产品的内在质量, 同时保证硬度均匀、畸变小, 轴承钢既可采用油冷也可采用高压气冷等热处理工艺。

2) 冰冷处理是为了确保产品的残留奥氏体量降至最低, 提高工件的耐磨性和尺寸在工作过程中的稳定性, 在淬火后马上进行冰冷处理 (-70°C 左右)。事实证明无论渗碳钢、低合金钢还是高速工具钢, 淬火后停留 1h 均会使残留奥氏体稳定化效果明显改善, 而回火后再进行冰冷处理, 则会造成耐磨性降低。

3) 尺寸的稳定化处理是为了消除热处理后的磨削加工应力对零件尺寸稳定性的影响, 通常在粗磨加工后进行 1~3 次的低温回火, 每次时间为 4~6h。对不同材料采用的稳定化处理工艺参数见表 3-50。

表 3-50 柱塞副和针阀体尺寸稳定化处理工艺参数

材料牌号	一次稳定回火	二次稳定回火	三次稳定回火	备 注
GCr15	$130^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$	$130^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$	—	粗磨后进行
GCr15SiMn	$175^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$	$155^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$	$130^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$	三次稳定化处理分别在回火、粗磨和精磨后进行
W18Cr4V、 W6Mo5Cr4V2	$120^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$	$120^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$	$120^{\circ}\text{C} \times 4 \sim 6\text{h}$	

4) 需要注意的是如果渗碳淬火后出现针阀体头部的断裂, 则表明断裂源于头部内孔并向外扩展, 这与渗碳后碳化物聚集区域的碳浓度高, 而靠近表面处碳浓度梯度很陡有关。淬火过程中零件中形成马氏体和较多的残留奥氏体, 而冷处理时大量残留奥氏体转变为马氏体, 造成表层存在较大的残留应力 (组织应力), 另外在淬火过程中, 阀体内腔狭小以及头部小油孔不利于淬火冷却介质的流动, 冷却效果差, 必然造成头部的外表面冷却快, 而内孔冷却慢, 故形成了一定的内应力 (热应力), 正是由于上述各种内应力的综合作用和内孔处应力的集中叠加作用, 内孔处裂纹迅速扩展, 造成了针阀体的断裂 (图 3-63)。因此为避免出现

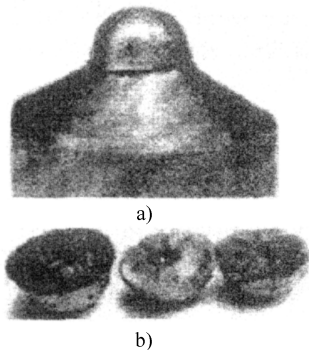


图 3-63 头部断裂的针阀体的宏观形貌

断裂，在实际的热处理过程中，应采取以下措施：降低渗碳碳势和渗层的碳浓度，即将新旧渗碳剂的比例降低；渗碳温度从 910℃ 降低到 880 ~ 890℃，时间适当缩短，这样有利于减小热应力，使晶粒较细；合理控制冷处理和回火工艺操作，适当延长回火时间，消除残留应力。

5. 针阀体热处理的常见缺陷与对策（表 3-51）

表 3-51 针阀体热处理的常见缺陷与对策

缺陷名称	原 因	危 害	对 策
断裂 (图 3-63)	① 淬火后应力集中，成为裂纹源 ② 渗碳后碳浓度过高或分布差异大，残留奥氏体多，马氏体组织应力大 ③ 头部油孔处内外冷却不均匀，产生应力集中	无法使用，作报废处理	① 严格控制冷处理工艺参数和及时进行回火处理 ② 降低渗碳碳势，减小渗碳层碳含量，或降低渗碳温度 ③ 喷油冷却处理，确保内外均匀冷却
硬度不均匀	① 型腔内的残盐未清除干净 ② 加热温度低或保温时间短，未充分奥氏体化 ③ 冷却不充分，有较多的残留奥氏体	使用寿命短	① 采用真空炉或可控气氛炉进行淬火处理 ② 进行金相组织检验，确保充分加热 ③ 采用循环油冷却，并及时进行冷处理
变形量大	① 去应力退火温度低或机械加工应力过大 ② 装炉方式不当或冷却时与外物碰撞 ③ 冷却不均匀	超过一定的范围，造成精度差，影响其使用寿命	① 采用合理的去应力措施 ② 按要求摆放零件，禁止叠压和撞击 ③ 零件要散开冷却，循环油温应控制在 60℃ 以下
金相组织不合格	① 加热温度过高或保温时间过长 ② 原材料的碳化物级别超差	脆性增大，容易开裂	① 严格执行正确的热处理工艺 ② 加强原材料的质量检验

参 考 文 献

[1] 曹寅昌. 汽车构造 [M]. 武汉：湖北科学技术出版社，1989.

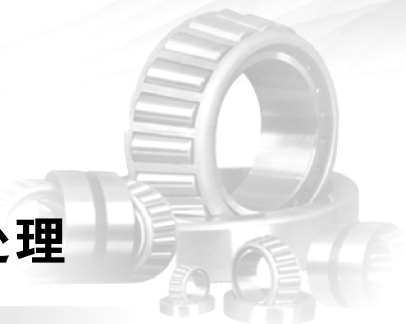
[2] 小林明. 汽车工程手册：第二分册 [M] 汽车工程手册编译委员会，译. 北京：机械工业出版社，1984.

[3] 小林明. 汽车工程手册：第三分册 [M] 汽车工程手册编译委员会，译. 北京：机械工业出版社，1984.

- [4] 侯家驹. 汽车制造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [5] 王忠诚, 马晓谦, 谢春生. 奥氏体钢气阀固溶处理用的燃气炉 [J]. 热处理技术与装备: 2010, 31 (3): 63-66.
- [6] 朱元浦, 侯增寿. 金属热处理问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [7] 朱曰彰, 卢亚轩. 耐热钢和耐热合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [8] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 马鸣图. 先进汽车用钢 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [10] 曲敬信, 汪泓宏. 表面工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [11] 陈天玉. 不锈钢表面处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [12] 程秀云, 张振华. 电镀技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [13] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第 2 卷 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [14] 苏德达, 李忆莲. 弹簧的失效分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [15] 张能武. 热处理入门 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2006.
- [16] 赵德寅, 王大伦. 汽车零件金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [17] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [18] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [19] 邓宏远, 王春景, 章舟. 等温淬火球墨铸铁的生产及应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [20] 朱桂英, 朱天军, 刘振生. 汽车发动机挺杆火焰淬火设备 [J]. 金属热处理: 2004, 29 (4): 65-66.
- [21] 裘汲, 何葆祥, 汪曾祥. 小件的热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [22] 王广生, 等. 金属热处理缺陷分析及案例 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.

第 4 章

传动系统零部件的热处理



4.1 概述

汽车传动系统是由离合器、变速器、传动轴、主减速器（含差速器）、车轮轴等部件组成的，该系统也称为动力传递系统或动力输送系统。传动系统的作用是改变发动机传来的转矩与转速，将转矩传递到汽车的驱动轮等。图 4-1 所示为全轮驱动汽车传动系统的构成。

1) 变速器位于汽车传动系统的离合器与主减速器之间，它能够传递和改变发动机传来的转矩与转速，转矩与转速的变换是通过变速器不同挡位齿轮的啮合实现的。变速器的齿轮是重要的传动部件，其采用低碳钢或低碳合金钢制造，经过表面化学热处理后，获得要求的力学性能。

2) 万向传动装置能保证各连接部件的传动轴有足够的运转稳定性，在规定的使用速度范围内不会出现共振，保证有最低的动载荷、较高的效率和具有一定的耐久性和可靠性。

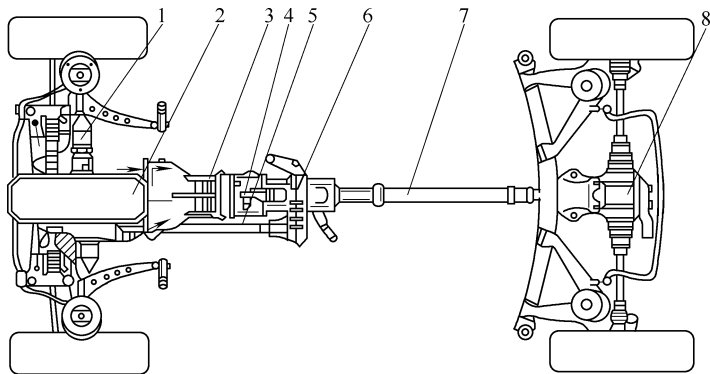
万向传动装置由传动轴、车轮轴和万向节等组成，其功能是传递转矩、适应传动方向的角度变化、允许传动部件的轴向位移等，由变速器交换的转矩通过万向传动装置传递给主减速器和驱动车轮等。

传动轴由轴管、滑动节、万向节组成，其中万向节的作用为改变动力的传递角，车轮轴布置在传动系统的主减速器与驱动车轮之间，汽车传动系统通常使用的万向节有 5 种（挠性万向节、三销轴式万向节、十字轴万向节、球形万向节以及双联万向节等），万向传动装置部件采用低碳合金钢、中碳钢等制造，经过热处理后获得要求的力学性能。

3) 汽车半轴将发动机动力通过变速器、后桥传到车轮，半轴工作时主要承受扭转力矩以及一定的冲击载荷，使车轮承受扭转力与冲击，是驱动车轮转动的直接

4) 汽车稳定杆是提高汽车行驶稳定性的部件(尤其是旅行轿车悬架),通常采用 60Si2MnA、50CrV、55SiMnVB、60CrMnB 等冷拔钢管制造,热处理工艺为淬火+高温回火,也可采用整体感应淬火、连续式感应淬火,获得细小高韧性的索氏体组织,目的是确保零件的刚性和弹性,是获得良好疲劳寿命的关键,可满足其服役条件的需要。

从以上几个方面来看,汽车传动系统零部件选用的材料多为低碳钢、低碳合金钢、调质钢以及部分弹簧钢等,根据具体的工作条件与技术要求,在零件的具体热处理方面,应提出技术指标与质量要求,主要包括材料的选择、加工流程、热处理工艺特点、失效方式与改进措施等,目的是确保零件具有高的使用寿命,这些内容在后面几节中将分别进行详细的介绍。



1—前驱动桥 2—发动机 3—离合器和变速器 4—传动装置
5—前万向传动装置 6—分动器 7—后万向传动装置 8—后驱动桥

4.2.1 钢制齿轮的热处理

汽车结构上一些零件既要求表面具有较高的硬度，保持高的耐磨性，又要求心部有较高的韧性，以确保整个零件获得足够的强度，因此该类零件大多采用低碳钢或低碳合金钢制造。通过适当的调质处理、表面淬火、渗碳、碳氮共渗、渗氮、氮碳共渗等热处理工艺，达到其使用要求。事实上，根据汽车零部件的服役条件与失效

形式可知,是否能够达到设计与使用的要求,并具有较高的使用寿命,在很大程度上取决于材料的选择与热处理方法,因此需要零件的设计者考虑零件的具体特点,有针对性地进行工艺参数的设定,并做到优化设计,这是实现零件长寿命的关键步骤。

汽车齿轮等是汽车结构中的重要零件,其工作环境恶劣,担负着传递动力、改变运动速度和方向的任务,在工作过程中,汽车变速器齿轮承受载荷的大小以及方向不断变化,同时齿轮会受到冲击力的作用。

汽车齿轮在工作过程中,齿面通过接触传递动力,故载荷主要作用在齿轮的牙齿上,牙齿的根部受到周期性弯曲应力的作用,牙齿容易产生疲劳断裂或脆性折断,牙齿的齿面受到接触应力与摩擦应力的作用,容易使齿面产生接触疲劳损坏或磨损等。

由此可见,汽车齿轮的工作条件恶劣,故要求其具有较高的静弯曲强度和接触疲劳强度,以及足够的冲击韧度与良好的耐磨性,从而保证齿轮的工作寿命与可靠性以及传递动力的灵活性等,提高汽车的质量。

影响汽车齿轮使用寿命的因素很多,除了设计、选材、冷加工以及使用条件外,齿轮的热处理质量具有直接的影响,而齿轮的热处理质量是通过金相组织来进行控制与鉴别的,故对齿轮的热处理过程进行准确的检验和严格的控制,是确保齿轮质量的关键。

1. 齿轮的工作条件及技术要求

齿轮工作时,通过齿面的接触来传递动力,其承受的主要载荷作用在齿轮齿顶上,汽车齿轮的齿根部位受到周期性弯曲应力的作用,其大小为 $700 \sim 800\text{MPa}$,使其发生疲劳断裂或脆性折断,而齿面受到接触应力的作用,接触应力是由两个齿面的相互接触而产生的,此时最高应力达到 $2500 \sim 3000\text{MPa}$ 。齿轮的受力状态十分复杂,只有经过化学热处理才能满足工作需要。

对于要求表面硬度高、而心部具有良好韧性的工件,如齿轮、齿轮轴、活塞销等零件,一般采用低碳钢加工成形,而后对其进行渗碳处理,这里以汽车变速器内的二、三级齿轮为例进行具体探讨。该齿轮用来把发动机的功率传递到后桥齿轮和半轴上,来驱动汽车行驶、承担改变汽车运动方向、改变发动机曲轴和传动轴的速度比的目的。在工作过程中齿根承受变载时的冲击及周期性交变弯曲载荷的作用,使用过程中有时出现脆性断裂或疲劳断裂,工作齿面受到较大脉冲式接触压应力及摩擦力的作用,在传递动力的过程中既有滚动也有滑动,加上外来硬质点的作用,会造成接触疲劳麻点及深层的块状剥落,另外在换挡过程中齿的端部受到大的冲击力,使齿端损坏,归纳起来有三种应力的作用即弯曲应力、摩擦应力和接触应力。

齿轮的主要失效形式为断齿、磨损、疲劳断裂及齿面蚀坑等。

1) 齿轮齿面磨损是指在咬合过程中, 齿面上会产生很大的压强, 齿面接触区摩擦, 使齿厚变小, 表面发生塑性变形而变得凸凹不平, 金属之间发生接触和粘着, 齿轮在滑动过程中产生磨损, 因此又产生了新的摩擦力, 齿面磨损是齿轮面相互摩擦的结果。齿轮的齿面磨损种类、受力及破坏特征见表 4-1。齿面磨损为齿轮的主要失效形式。

表 4-1 齿轮的齿面磨损种类、受力及破坏特征

磨 损 种 类	载荷及运行情况	表面破坏特征
氧化磨损	各种大小的载荷及各种滑动速度	在工作过程中, 不断形成氧化膜, 不断剥落, 但磨损速度小, 一般为 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m/h}$, 齿面均匀分布着细致的磨纹
冷咬合磨损	高载荷、低滑动速度, 一般速度不大于 1m/s	局部金属直接接触和粘着, 不断从齿面撕离; 磨损速度较大, 一般为 $10 \sim 15 \mu\text{m/h}$; 齿面有严重的伤痕
热咬合磨损	高载荷、高滑动速度, 一般速度大于 $3 \sim 4\text{m/s}$	高的摩擦热使润滑油膜失效, 金属间直接接触, 发生粘着和撕离; 磨损速度一般为 $1 \sim 5 \mu\text{m/h}$; 齿面伤痕多
磨粒磨损	各种大小的载荷及各种滑动速度	各种磨粒进入啮合齿面, 嵌入形成切刃或直接切割齿面, 磨损速度为 $0.5 \sim 5 \mu\text{m/h}$; 齿面有磨粒刮伤纹

2) 弯曲疲劳断裂主要从根部发生, 齿轮咬合时齿根部位受到最大振幅的脉动作用, 或交变的弯曲应力的作用, 造成齿部的断裂, 这是齿轮最严重的失效形式, 常常因一齿断裂而引起数齿甚至所有齿的断裂。

3) 齿面磨损断裂。齿轮在工作过程中, 如果齿面上的接触应力超过了材料本身的疲劳强度, 则会产生接触疲劳断裂。

4) 齿面接触疲劳破坏。在交变接触应力的作用下, 齿面产生微裂纹, 微裂纹的发展引起点状剥落 (表面麻点剥落、浅层剥落和深层剥落等)。

5) 过载断裂主要是冲击载荷过大造成的断齿。

综合分析齿轮的工作状态和失效的主要形式, 为确保齿轮有高的使用寿命, 变速器的齿轮必须具有以下特性: 表面有高的硬度和良好的耐磨性; 良好的弯曲疲劳强度、高的静弯曲强度和接触疲劳强度; 心部具有最佳的强度和冲击韧度, 抗冲击性强; 较好的热处理性能, 热处理变形小。

满足以上性能要求的汽车齿轮, 才有可能保障其有较长的使用寿命, 确保齿轮的工作寿命和可靠性。表 4-2 为在磨损和交变应力作用下零件的选材及其热处理。

表 4-2 在磨损和交变应力作用下零件的选材及其热处理工艺

工 作 状 况	材 质	热处理工艺	变 形 情 况	允许的零件形状
传递功率大，摩擦力大， 速度不高，冲击力大	低碳合金钢	渗碳 + 淬火	较小	简单、复杂均可
	低碳钢		大	
传递功率大，摩擦力大， 速度不高，冲击力不太大	中碳钢	高频感应淬火	小	简单工件
传递功率大，摩擦力小， 速度高，冲击力小	中碳合金钢	渗氮	极小	简单、复杂均可

从齿轮的工作条件来看，其在耐磨性、疲劳强度与心部强度、冲击韧度等方面的配合要求比较高，在某种程度上高频感应淬火很难满足使用要求，而渗碳钢经渗碳、淬火和低温回火可保证工作的需要。对齿轮进行表面处理，可以提高表面硬度和耐磨性，同时耐蚀性和疲劳强度明显提高。

JN-150 载货汽车变速器中的第二轴的二、三挡齿轮的工艺流程为：下料→锻造→正火→机械加工→渗碳、淬火、低温回火→喷丸→磨内孔→装配。

齿轮渗碳的技术要求：表面碳质量分数为 0.8% ~ 1.05%；渗碳层厚度为 0.8 ~ 1.3mm，渗碳淬火表面硬度≥59HRC；低温回火表面硬度为 58 ~ 64HRC，心部硬度为 33 ~ 48HRC；变形量小和金相组织符合要求。

2. 材料的选用

根据齿轮的受力状况及工作条件，对于齿轮材料提出如下性能要求：高的弯曲疲劳强度，特别是齿根要有足够的强度，以保证运行时所产生的弯曲应力不致造成疲劳断裂；高的接触疲劳强度、高的表面硬度和耐磨性，防止齿面磨损；足够的齿轮心部强度和冲击韧度，防止过载与冲击断裂；原材料材质纯净，断面侵蚀后不得出现可见的气泡、裂纹、非金属夹杂物及白点等缺陷，其疏松和夹杂物等级应符合有关标准规定；具有良好的切削加工性，淬火变形小，以获得高的加工精度和低的表面粗糙度值，提高齿轮的耐磨性；价格低廉，材料来源充足等。

为确保齿轮的表面耐磨性好、心部有足够的强度和韧性，绝大多数齿轮选用渗碳钢或调质钢制作，渗碳钢的碳质量分数为 0.15% ~ 0.35%，加入适当的合金元素，可起到细化晶粒的作用。通常是低碳合金钢进行渗碳处理，常用材料有 20Cr、12Cr2Ni4A、20CrMnTi 等，也可采用调质钢如 40Cr、45、40CrNi、40CrNiMoA 等制造。

一般齿轮选用材料的原则如下：对于小模数齿轮，只要求心部有足够的韧性，采用低碳钢即可满足要求，受力较大的变速器齿轮则必须选用 20CrMnTi 钢制造，该钢不仅具有良好的韧性而且有足够的强度，符合齿轮的工作需要。在 20CrMnTi 钢中，低的含碳量是保证齿轮心部具有高的塑性和韧性的前提，合金元素铬和锰的加入提高了该钢的淬透性，渗碳后淬火内部能获得低碳马氏体组织，提高基体的强韧性。关于

铬对渗碳层中含碳量的影响，资料介绍，随着铬含量的增加，渗层中碳含量上升，在铬的质量分数为 1.5% 左右时，渗碳层中的碳含量达到最大值，其原因在于铬为碳化物的形成元素，可吸收大量的碳进入表层，同时铬也加速了界面反应，促使工件表面吸收活性碳原子。铬的质量分数在 3% 以下时，其对渗碳层的影响不大，在高温渗碳时有减少渗层厚度的趋势，长时间渗碳则会引起晶粒的长大。锰对渗碳层的厚度和表面的含碳量基本上没有影响，但它促使渗碳时奥氏体晶粒的长大。加入钛的目的在于限制钢的晶粒长大，提高了钢的强度和韧性，使该钢的热处理工艺性能得到了改善，渗碳后可以直接淬火。20CrMnTi 钢采用正火处理后，有利于切削加工。该钢具有以下特点：机械加工性能好；过热敏感性小；渗碳速度快；渗碳后淬火变形小，尺寸稳定；淬透性好，内外硬度符合技术要求，提高了疲劳强度；具有高的低温冲击韧度和高的抗弯强度，能够承受变换齿轮的冲击力和咬合力作用。

齿轮经化学热处理后（渗氮、碳氮共渗或渗碳等）可进行直接淬火，而采用调质热处理后晶粒度和变形量比渗碳小，耐磨性和疲劳强度分别提高 40% ~ 60% 和 50% ~ 80%，由此可见调质钢和渗碳钢各有特点。汽车、拖拉机齿轮常用钢材及热处理工艺（渗碳、碳氮共渗）见表 4-3，对渗碳齿轮的渗碳层深度规定如下（以解放车为例）：变速器齿轮渗碳层为 0.9 ~ 1.3mm，后桥主动和从动齿轮渗碳层为 1.2 ~ 1.6mm，半轴齿轮、行星齿轮渗碳层等多为 1.0 ~ 1.4mm。

表 4-3 汽车、拖拉机齿轮常用钢材及热处理工艺（渗碳、碳氮共渗）

齿 轮 类 型	材 质	热处理工艺
汽车变速器和差速器用齿轮	20CrMo	渗碳
	20CrMnTi	
	40Cr	碳氮共渗
汽车驱动桥主动及从动圆柱齿轮、锥齿轮，差速器行星和半轴齿轮	20CrMo	渗碳
	20CrMnTi	
	20CrMnMo	
	20MnVB	
汽车起动电动机齿轮	20Cr	渗碳
	20CrMo	
	20CrMnTi	
汽车曲轴正时齿轮	40、45 40Cr	调质
汽车发动机凸轮轴凸轮	HT150	—
	HT200	
汽车里程表齿轮	20	碳氮共渗
汽车、拖拉机液压泵齿轮	40、45	调质

上述渗碳和碳氮共渗用钢主要用于制作耐磨性好、承受载荷作用的齿轮；用于生产运行速度高、周期长、安全可靠性高的齿轮；需要传递功率大、齿轮表面载荷高、耐冲击的齿轮以及尺寸大的齿轮。

齿轮用钢又分为调质钢、表面淬火钢，例如 35、45、55、40Mn、50Mn、40Cr、35SiMn、42SiMn、35CrMo、42CrMo、40CrMnMo、35CrMnSi、40CrNi、40CrNiMo、30CrNi3、37SiMn2MoV 等，这些材料经热处理后也可直接使用。目前齿轮经过渗氮处理后，使用寿命和性能同样可满足其工作需要。不同使用条件下渗氮齿轮用钢材料的选择见表 4-4。

表 4-4 不同使用条件下渗氮齿轮用钢材料的选择

齿轮的工作状况	对齿轮的性能要求	推荐的材料牌号
一般用途	要求表面耐磨性好	45、40Cr、20CrMnTi
有一定的冲击载荷作用	表面耐磨、心部韧性高	18Cr2Ni4WA、30CrNi3、35CrMo
在重载荷下工作	表面耐磨、心部强度高	35CrMoV、42CrMo、40CrNiMo、25Cr2MoV
在重载荷及冲击作用下工作	表面耐磨、心部韧性和强度高	40CrNiMoA、34CrNi3Mo
精密传动	表面耐磨性好，畸变小	38CrMoAlA、38CrMoAlA

另外，根据齿轮的工作状况和寿命要求，铸铁齿轮已经应用于汽车上，铸铁齿轮与钢制齿轮相比，具有机械加工性良好、耐磨性好、噪声低以及成本低等特点，常用铸铁为灰铸铁和球墨铸铁两类，灰铸铁的抗拉强度低、脆性较高，但耐磨性好、减振性佳、缺口敏感性小。常见牌号为 HT150、HT200、HT250、HT300、HT350 等。球墨铸铁的性能则介于钢和灰铸铁之间，是很有前途的齿轮用材料，主要牌号有 QT400-15 和 QT400-18（铁素体组织）、QT450-10（铁素体组织）、QT500-7（珠光体 + 铁素体组织）、QT600-3、QT700-2、QT800-2（珠光体组织）以及 QT900-2（下贝氏体组织）等。

3. 齿轮的机械加工工艺流程

通常制作齿轮的毛坯材料要经过锻造，以消除钢中的碳化物偏析，有利于得到合格的金相组织和性能，确保齿轮在复杂载荷下工作所需要的强度和冲击韧度，一般的流程为：剪切下料→锻造→正火或调质→车外圆和拉孔→去应力退火→精加工（拉、插、铣、剃等）→渗氮、氮碳共渗。

渗碳齿轮的加工流程为剪切下料→齿坯成形→预备热处理→切削加工→渗碳→淬火和回火→喷丸→精加工。渗氮齿轮的工艺路线为剪切下料→锻造退火或正火处理→滚齿→剃齿→渗氮。精密齿轮为锻造→调质或正火处理→粗车→调质→半精滚齿→去应力退火→精滚齿→剃齿→渗氮→珩磨。

剪切下料可采用热切或冷切，如果材料强度过高，坯料横截面积过大，在剪切下料时将产生过大的硬度，造成剪切裂纹的出现。如果表面有严重的纵向划痕或发纹，会对裂纹起到诱发和促进作用。

齿轮的预备热处理是指对成形的齿坯进行的最常用的热处理，即退火或正火处理与调质处理，正火或退火一般安排在铸造或锻造之后，即粗加工前进行，目的是获得良好的切削加工性、消除钢件锻造时产生的残留应力、细化晶粒和改善组织等，减小淬火时变形和开裂的倾向。正火温度为 900 ~ 970℃，硬度为 156 ~ 269HBW。调质处理的目的是细化晶粒和使组织均匀，由于获得了回火索氏体组织，因此齿坯的韧性更高，该工序一般安排在粗加工后（如低碳钢）。另外对部分齿轮进行去应力退火，可起到稳定组织和减少变形的作用。

齿轮毛坯的预备热处理工艺见表 4-5。

表 4-5 齿轮毛坯的预备热处理工艺

材 料 牌 号	正火工艺规范	硬度 HBW	显 微 组 织	备 注
20Cr	正火：900 ~ 960℃ 空冷 或风冷	156 ~ 179 (179 ~ 207)	均匀分布的 片状 P + F	推荐高于渗碳温度 30 ~ 50℃ 加热 为了改善切削加工 性，提高加工质量， 采用下列措施： ① 提高正火温度， 快速冷却 ② 采用等温退火 工艺
20CrMo 20CrMnTi 20MnVB	正火：920 ~ 1000℃ (常用 920 ~ 970℃)	156 ~ 207 (179 ~ 217)	粒状或细片 状 P + 少量 F	
20CrMnMo 20CrNi3 20Cr4Ni2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA	正火：880 ~ 940℃ 回火：650 ~ 700℃	171 ~ 229 (20CrMnMo) 其余为 207 ~ 269		
20Cr2Ni4A 18Cr4Ni4WA	回火：640 × 6 ~ 24h 空冷 正火：880 ~ 940℃ 空冷 回火：650 ~ 700℃	207 ~ 269		
40Cr 40Mn2	正火：860 ~ 900℃ 空冷	179 ~ 229	均匀分布的 片状 P + F	

对于渗碳齿轮而言，通常的热处理程序为：清理零件表面→装炉→渗碳、淬火→中间检验→清洗→回火→校花键孔。

4. 齿轮的渗氮、氮碳共渗、渗碳和碳氮共渗等热处理工艺

齿轮表面要求有高的耐磨性，而心部具有良好的韧性和足够的强度，因此采用渗碳钢、调质钢和渗氮用钢等进行化学热处理可获得要求的力学性能，一般齿面硬度为 56 ~ 63HRC，心部硬度为 30 ~ 45HRC，有效硬化层硬度为 300 ~ 450HV。渗碳或碳氮共渗层深为 (0.2 ~ 0.3) m (m 为齿轮的模数)，渗碳钢表面碳质量分数为

0.7% ~ 0.9%，碳氮共渗后碳质量分数为 0.7% ~ 0.9%、氮质量分数为 0.2% ~ 0.4%。需要注意的是齿轮的外观质量，表面应光洁、无裂纹和毛刺等，工作表面不允许有锈迹、黑皮、凹坑等缺陷。

(1) 齿轮的渗氮 齿轮的渗氮处理通常包括气体渗氮、离子渗氮等，其具体特点与工艺要求介绍如下。

1) 渗氮的特点和主要技术要求。齿轮经渗氮后，具有变形小、表面硬度高、耐磨性好等优点。组织中以 ϵ 相为主的化合物层的脆性高，一般渗氮后其冲击韧度下降，渗氮后得到的渗层较厚（一般大于 0.35mm），齿轮渗氮多以气体渗氮和离子渗氮为主，经处理的齿轮质量稳定，工艺过程简单，操作比较方便，齿轮的加热温度低，不需淬火处理，故齿轮的变形小，形成的渗氮层还具有高的耐蚀性，因此渗氮齿轮不需要进行镀锌和发蓝等表面处理。考虑到齿轮的工作特点，资料介绍，适当提高基体的调质或正火硬度，有助于提高齿轮心部的强度，为了提高承载高速重载齿轮的力学性能，齿轮经调质处理后心部的硬度应在 30HRC 以上。该类齿轮材料大多为含有铝、铬、钼、钛和钒等的合金钢，另外耐蚀渗氮多用于碳素钢和铸铁材料，处理后的齿轮可在较强的腐蚀性环境中（大气、自来水、热蒸汽以及弱碱中）工作。

齿轮材料的原始状态与渗氮层硬度的对应关系见表 4-6。

表 4-6 齿轮材料的原始状态与渗氮层硬度的对应关系

材料牌号	原始状态		渗氮层表面硬度 HV5
	预备热处理	硬 度	
45	正火	220 ~ 250HBW	250 ~ 400
20CrMnTi	正火	180 ~ 200HBW	650 ~ 800
	调质	200 ~ 220HBW	600 ~ 800
42CrMo	调质	29 ~ 32HRC	550 ~ 700
40CrNiMo	调质	20 ~ 27HRC	450 ~ 650
40CrMnMo	调质	220 ~ 250HBW	550 ~ 700
40Cr	正火	200 ~ 220HBW	500 ~ 700
	调质	210 ~ 240HBW	500 ~ 650
37SiMn2MoV	调质	250 ~ 270HBW	48 ~ 52HRC
25Cr2MoV	调质	270 ~ 290HBW	700 ~ 850
20Cr2Ni4A	调质	25 ~ 32HRC	550 ~ 650
18Cr2Ni4W	调质	27 ~ 30HRC	600 ~ 820
35CrMoV	调质	250 ~ 320HBW	550 ~ 700
38CrMoAl	正火	207 ~ 217HBW	850 ~ 1050
	调质	217 ~ 223HBW	800 ~ 900
38CrMoAlA	调质	260 ~ 280HBW	950 ~ 1200

2) 注意事项。从表 4-6 中可知渗氮齿轮的预备热处理有正火和调质处理两种工艺, 正火适用于中碳钢, 而调质大多是中碳合金钢的处理方式, 渗氮前的去应力退火可消除加工应力、稳定尺寸, 为最终的渗氮做好准备。考虑到相变点的温度对渗氮质量的影响, 去应力退火温度应高于渗氮温度 20 ~ 30℃, 同时要低于调质处理的温度, 这样才能确保齿轮的基体强度和硬度符合技术要求。

应对不需要渗氮的部位采取局部防渗措施, 根据渗氮方式的不同, 采取的措施也不相同, 一般有金属覆蔽法、非金属覆蔽法、化学保护法等, 对于气体渗氮而言, 通常采用以下三种方法:

① 镀锡法, 一般膜厚 0.003 ~ 0.015mm, 当厚度大于 0.010mm 时, 应在 350℃ 左右进行 1 ~ 2h 的镀锡处理。

② 镀铜法, 一般无孔隙镀膜厚 0.010 ~ 0.020mm。

③ 涂料法, 需要选择合适的涂料, 并进行烘干处理, 确保在渗氮过程中不剥落, 也可进行磷化处理, 同样达到防渗的目的。

对于离子渗氮则无法采用上述方法, 应采取机械防渗措施: 内孔采用心轴或端盖来屏蔽, 外螺纹、外圆可使用螺母、套筒等防渗, 内螺纹用铆钉、销轴或螺塞等塞住, 达到防渗的目的。

3) 齿轮的气体渗氮工艺。根据齿轮的技术要求和工作特点, 在实际生产过程中通常采用两种渗氮工艺, 具体见表 4-7, 气体渗氮温度一般为 500 ~ 560℃, 时间可根据试验或经验而定, 通常渗速为 0.010mm/h。

表 4-7 齿轮气体渗氮工艺方法及其应用

工艺方法	工艺曲线	说 明
一段 (或等温) 渗氮法		渗氮温度低, 变形小, 但工艺周期较长, 而且易产生高脆性渗氮层 适用于硬度要求高, 渗层浅以及容易变形的齿轮
二段渗氮法		可以缩短工艺周期, 适用于不仅要求硬度高, 而且渗层较厚的齿轮

齿轮模数与渗氮层深度的关系见表 4-8。

表 4-8 齿轮模数与渗氮层深度的关系

齿轮模数/mm	≤1.25	1.5 ~ 2.5	3.0 ~ 4.0	4.5 ~ 6.0	>6
推荐的渗层厚度/mm	0.15	0.30	0.40	0.50	>0.50

4) 齿轮的离子渗氮工艺。随着渗氮热处理设备的研发,目前离子渗氮技术已经成熟,其主要的工艺参数如下:辉光电压维持在 500 ~ 700V;电流密度为 2 ~ 15mA/cm²;炉内真空度为 133.322 ~ 1333.22Pa;渗氮介质为液氮挥发气、热分解氨或氮氢混合气;渗氮温度采用 520 ~ 530℃ 和 560 ~ 580℃,其余材料采用的等温渗氮温度为 520 ~ 550℃ 等。渗氮时间与渗氮层深度的关系为

$$\delta = KD\tau$$

式中,δ 为渗氮层深度 (mm);τ 为渗氮时间 (min);D 为扩散系数;K 为常数。渗氮层深度为 0.20 ~ 0.60mm,渗氮时间为 8 ~ 30h。

常见齿轮材料的离子渗氮工艺和表面硬度及厚度的关系见表 4-9。渗氮齿轮常见缺陷和防止措施见表 4-10。

表 4-9 常见齿轮材料的离子渗氮工艺和表面硬度及厚度的关系

材 料	渗 氮 规 范	渗 氮 结 果	
		表面硬度 HV5	渗层/mm
40Cr	480℃ × 8h	613 ~ 633	0.25 ~ 0.30
	500℃ × 8h	613 ~ 633	0.35 ~ 0.40
	560℃ × 8h	500 ~ 550	0.40 ~ 0.45
20CrMnTi	520 ~ 540℃ × 10 ~ 12h	700 ~ 780	0.45 ~ 0.55
	500℃ × 2h	689	0.10
20Cr	500 ~ 520℃ × 10 ~ 12h	550 ~ 650	0.45 ~ 0.50
	520 ~ 540℃ × 10 ~ 12h	550 ~ 650	0.45 ~ 0.55
38CrMoAlA	520 ~ 530℃ × 10h	950	0.28
	540 ~ 560℃ × 8h	960 ~ 1006	0.32 ~ 0.35

表 4-10 渗氮齿轮常见缺陷和防止措施

序 号	缺 陷 名 称	产 生 原 因	防 止 措 施
1	心部硬度低	① 预备热处理淬火温度低 ② 调质回火温度高 ③ 调质时冷却速度不够	① 提高加热温度 ② 控制调质的回火温度 ③ 改善冷却速度
2	渗氮层深度过浅	① 渗氮温度过低 ② 炉内氮势低 ③ 保温时间过短	① 提高渗氮温度 ② 检查有无漏气、降低氮的分解率 ③ 适当延长保温时间
3	表面高硬度区太薄	① 第一阶段温度低或时间短 ② 第二阶段温度高	① 调整第一阶段的渗氮温度，延长时间 ② 合理控制第二阶段的温度
4	硬度梯度陡	第二阶段温度偏低，时间过短	提高第二阶段的渗氮温度，适当延长保温时间
5	渗层深度不均匀	① 渗氮温度不均匀 ② 零件之间相互碰撞 ③ 气体的速度过大	① 合理装炉和选择夹具 ② 改善炉内零件温度的均匀性 ③ 控制气流量
6	局部软点	① 齿轮表面有脏物或氧化皮 ② 防渗镀、涂时污染	① 清理齿轮表面、保持清洁 ② 合理进行防渗镀、涂
7	表面硬度偏低	① 材料使用错误 ② 渗氮温度高或低 ③ 渗氮时间短 ④ 炉内氮势偏低	① 检查材料成分 ② 调整渗氮温度和时间，降低氮的分解率，检查漏气情况
8	组织中出现网状或鱼骨状渗氮物	① 齿轮表面有脱碳层 ② 渗氮温度过高 ③ 炉内氮势高	① 去掉脱碳层 ② 控制渗氮温度 ③ 控制氮的分解率
9	表层脆性大，产生剥落	① 表面含氮量过高 ② 渗氮层过深 ③ 表面脱碳 ④ 预备热处理有过热现象，晶粒粗大	① 降低含氮量 ② 采用二段渗氮法，后期退氮 ③ 留足加工余量，采取保护加热 ④ 细化原始晶粒

(2) 齿轮的氮碳共渗 齿轮的氮碳共渗多用于在较小接触应力条件下工作的进给系统用齿轮，处理后的齿轮具有良好的耐磨性和高的疲劳强度，显著提高了使用寿命。

资料介绍，低负荷 45 钢齿轮，如传递中、小转矩的汽车齿轮，若采用气体渗氮或离子渗氮工艺，则齿轮的渗层硬度偏低、寿命不长，同时效率低，影响齿轮的

正常使用，故多数选用硫氮碳共渗或氮碳共渗工艺，这种方法适合用作形状复杂、变形要求小的齿轮的化学热处理。

常见材料氮碳共渗后的硬度与深度的关系见表 4-11。

表 4-11 常见材料氮碳共渗后的硬度与深度的关系

钢 材 牌 号	表面硬度 HV0.2	共渗层深度/mm	
		化合物层	扩散层
纯铁	600 ~ 750	0.007 ~ 0.020	0.30 ~ 0.70
10	550 ~ 700	0.007 ~ 0.015	0.20 ~ 0.40
20	550 ~ 700	0.007 ~ 0.015	0.20 ~ 0.40
45	550 ~ 700	0.007 ~ 0.015	0.15 ~ 0.30
T10	500 ~ 650	0.007 ~ 0.010	0.10 ~ 0.20
20Cr	650 ~ 800	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.20
40Cr	650 ~ 800	0.005 ~ 0.012	0.10 ~ 0.20
QT600-3	550 ~ 750	0.001 ~ 0.005	0.04 ~ 0.06
灰铸铁	550 ~ 750	0.001 ~ 0.005	0.04 ~ 0.06

由于氮碳共渗能显著提高齿轮的耐磨性，抗咬合和抗擦伤能力，同时能提高其疲劳强度，汽车用齿轮的工作状况差，且要求具有高的使用寿命，采用该类表面强化措施可确保齿轮满足技术要求。表 4-12 为几种常见齿轮材料的氮碳共渗工艺和结果。

中、高负荷齿轮若采用渗层较浅（≤0.30mm）的氮碳共渗工艺，则渗层可能在高压应力作用下压碎，其疲劳强度与承载能力不能满足服役条件，故一般选用气体渗氮或离子渗氮等。

表 4-12 几种常见齿轮材料的氮碳共渗工艺和结果

材 料 牌 号	工艺方法 序号	化 合 物 层		扩 散 层 深 度/mm		备 注
		深度/μm	硬度 HV0.05	侵蚀层	硬化层	
45	1	10 ~ 12	562 ~ 685	0.2 ~ 0.4		
	2	24 ~ 26	760		0.55	
	3	7 ~ 15	550 ~ 700	0.35 ~ 0.55		HV0.1
	4	10 ~ 25	450 ~ 650	0.24 ~ 0.38		
40Cr	1	7 ~ 15	611 ~ 772	0.15 ~ 0.25		
	2	20 ~ 24	960	0.40	0.30	
	3	6 ~ 12	550 ~ 800	0.10 ~ 0.20		HV0.1
	4	4 ~ 10	560 ~ 600	0.12		

(续)

材 料 牌 号	工艺方法 序号	化 合 物 层		扩散层深度/mm		备 注
		深度/μm	硬度 HV0.05	侵蚀层	硬化层	
30CrMoA	1	7 ~ 12	888 ~ 940	0.10 ~ 0.20		
	2	20 ~ 22	1170	0.35	0.22	
	3	5 ~ 12	900 ~ 1100	0.10 ~ 0.20		HV0. 1
30CrMo	2	19 ~ 21	960	0.40	0.32	
35CrMo	3	5 ~ 12	650 ~ 800	0.10 ~ 0.20		HV0. 1
18Cr2Ni4W	1	9 ~ 10	860	0.27		560℃ × 4h
工艺方法序号	氮碳共渗工艺				温度/℃	时间/h
1	氨气 + 酒精				565 ~ 575	3
2	盐酸催渗气体氮碳共渗					2
3	尿素					3
4	尿素 + 甲酰胺					2

(3) 齿轮的渗碳和碳氮共渗 低碳钢和低碳合金钢齿轮的热处理采用气体渗碳（或固体渗碳）和淬火处理，使表面获得高的硬度和良好的耐磨性，而心部仍保持一定的强度和韧性、塑性等。中碳钢或中碳合金钢采用淬火的方法，大多数齿轮经过渗碳或碳氮共渗后，其热处理方式和冷却方式根据技术要求进行选择，以获得要求的力学性能和技术指标。通常采用气体渗碳或碳氮共渗，个别采用液体碳氮共渗进行化学热处理。其基本工艺流程为：渗碳（920 ~ 940℃）或碳氮共渗（840 ~ 860℃）→炉内预冷、均热 830 ~ 850℃（碳氮共渗不预冷）→直接淬火（油冷或热油马氏体分级淬火）→回火（180℃ × 2h）。对于变形要求严格、需要机械加工和固体渗碳的齿轮，应在冷却后再进行加热淬火处理。渗碳淬火后表面具有高的硬度和耐磨性，心部仍保持一定的强度和韧性。齿轮渗碳或碳氮共渗后一般不进行直接淬火，在生产过程中一般有以下几种冷却方式供选择：

① 空冷多用于气体或盐浴渗碳（或碳氮共渗），应降温出炉，增大冷却速度，减少脱碳倾向。

② 在冷却井或坑中冷却，冷却井或坑是一个四周盘有蛇形管通水冷却的带盖容器，向其中通入保护气或加入煤油。

③ 在 700℃ 等温盐浴中保温后空冷，多用于盐浴渗碳或碳氮共渗，可减少齿面的脱碳。

④ 在罐内冷却，多用于固体渗碳。

⑤ 在缓冷坑中冷却或油冷，20CrMnMo、20CrNi3 钢采用此冷却方式。

采用气体渗碳的工艺温度为 920 ~ 940℃，要求渗碳层浅的齿轮采用下列温度：当渗层为 0.35 ~ 0.65mm 时，温度为 870 ~ 890℃；当渗层为 0.65 ~ 0.85mm 时，温度为 890 ~ 910℃；当渗层为 0.8 ~ 1.0mm 时，温度为 910 ~ 930℃。不同温度下渗层深度与渗碳时间的关系见表 4-13。

表 4-13 不同渗碳温度下渗层深度与渗碳时间的关系

渗碳时间/h	渗碳层深度/mm		
	875℃	900℃	925℃
2	0.64	0.77	0.89
4	0.84	1.06	1.27
8	1.27	1.52	1.80
12	1.56	1.85	2.21
16	1.80	2.13	2.54
20	2.0	2.39	2.84
24	2.18	2.62	3.10
30	2.46	2.95	3.48
36	2.74	3.20	3.81

20CrMnTi 钢低滴量气体渗碳工艺曲线如图 4-2 所示。该工艺的特点为排气过程中采用大滴量，吸收和扩散过程中采用小滴量，甲醇和煤油交替使用。

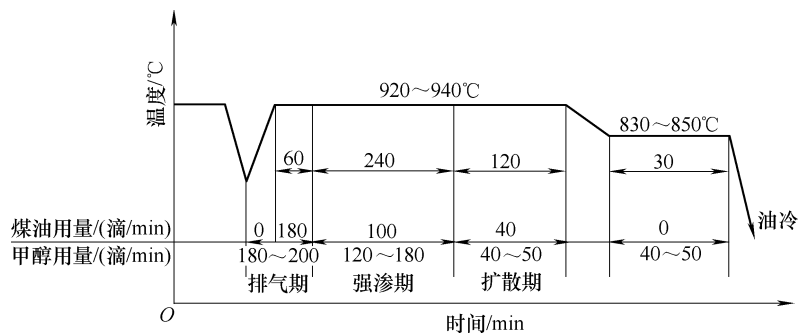


图 4-2 20CrMnTi 钢低滴量气体渗碳工艺曲线

20CrMnTi 钢制造的变速器齿轮经上述渗碳工艺处理后，各项技术指标符合要求，质量稳定。资料介绍，对齿轮进行预氧化，即在 500 ~ 600℃ 的空气炉中加热形成氧化膜，则在渗碳开始阶段不再被氧化和脱碳，能促进渗层的增加和使用寿命的提高以及提高渗碳层的均匀性等。齿轮渗碳热处理后进行喷丸处理，既可去除毛刺或表面的氧化皮等表面脏物，又可在其表面形成压应力，从而提高了齿轮的疲劳强度和抗弯曲能力。另外采用双排无炉罐渗碳炉进行渗碳，通常该类热处理炉分为

五个区域（或区段），具体要求见表 4-14。一区为加热区，预氧化可防止入炉再被氧化。二区为预渗区，800℃ 以上已经有渗碳能力，合理确定渗碳温度有助于零件达到均匀的渗碳温度。三区为渗碳区，为防止晶粒粗大，应在 910 ~ 930℃ 进行渗碳。渗碳层的深度与渗碳温度的关系为：渗碳层为 0.35 ~ 0.85mm 时，温度为 870 ~ 890℃；渗碳层为 0.5 ~ 0.85mm 时，炉温为 890 ~ 910℃；渗碳层为 0.85 ~ 1.0mm 时，炉温则为 910 ~ 930℃。四区加热温度为 900℃，可获得连续平缓的过渡区。五区温度下降，是因为考虑到出炉后零件的温度有所降低。

表 4-14 齿轮在无炉罐渗碳炉中渗碳的工艺规范

区 段	一	二	三	四	五	缓冷温度 /℃	热处理工艺技术要求
温度/℃	900	930	930	900	840	860	淬火，油温低于 90℃，在 190℃ 回火 处理
吸热式气体 流量/(m ³ /h)	6	8	12	12	17		
碳势（%）	—	0.9	1.1 ~ 1.15	1.0 ~ 1.1	0.9		

齿轮渗碳淬火后畸变的主要形式见表 4-15。预防措施如下：设计齿轮时应使其结构合理，形状对称、轮辐的强度及键槽的位置合理等；使用化学成分和冶金质量符合要求的钢材，锻坯或粗加工的毛坯应进行预备热处理，以此来保证钢材具有良好的金相组织和可加工性；选用合理的淬火工夹具，使渗碳件在渗碳过程中温度均匀、不受外力的作用，同时使渗碳气氛合理流动，淬火时零件均匀冷却，从而减少淬火变形；选用较低的淬火温度或冷却能力较缓的淬火冷却介质，也可采用分级、等温等淬火方法降低应力和减少变形；控制齿轮花键孔的精度，采用模压淬火；根据齿轮的热处理变形规律调整其机械加工尺寸。

表 4-15 齿轮渗碳淬火后畸变的主要形式

齿 轮 种 类	齿轮参数变化	热处理后畸变趋势
圆柱齿轮	直径变化	盘状齿轮齿顶圆直径变大，轴齿轮齿顶圆直径通常缩小
	齿顶圆及内孔的不均匀变化	齿轮材料的质量不均匀，几何形状不对称及机械加工不当，热处理后出现不均匀胀缩，形成椭圆
	平面翘曲及齿圈锥度	盘状齿轮外径较大，端面容易产生翘曲及齿圈形成锥度
	齿轮间尺寸变化	两端面齿厚胀大，齿宽中间呈凹形

(续)

齿 轮 种 类	齿轮参数变化	热处理后畸变趋势
齿轮轴	轴向变化	多是材料、几何形状及加工工艺等原因造成齿轮弯曲畸变
锥齿轮	齿 轮 端 面 及 内孔畸变	齿轮端面翘曲，内孔呈椭圆形
斜齿轮	螺旋角变化	螺旋角变小，斜齿盘齿轮角度将变大；斜齿轴齿轮角度改变较小，曲线齿齿圈、锥齿轮、主动轮角度改变增大
带花键齿轮	内孔胀缩	低合金钢齿轮渗碳淬火后，通常内孔缩小；淬透性越高，渗层越厚，则内孔收缩越大，而内孔防渗的齿轮微胀
	内孔锥度	截面较小的位置，内孔收缩较大；截面较大处内孔收缩较小或微胀

齿轮经渗碳和碳氮共渗后，根据齿轮的具体工作环境和受力情况，可进行不同温度的淬火和回火，表 4-16 列出了几种常见渗碳、碳氮共渗齿轮的热处理方法。

表 4-16 常见渗碳、碳氮共渗齿轮的热处理方法

钢 号	序号	齿 轮 类 型	热处理工艺
20CrMnTi 20MnVB 20CrMo 20CrMnMo	1	大多数为经气体或液体渗碳（或碳氮共渗）的齿轮	渗碳（920 ~ 940℃）或碳氮共渗（840 ~ 860℃）→ 炉内预冷，830 ~ 850℃均热（碳氮共渗者不预冷）→ 直接淬火（油淬或热油马氏体分级淬火）→ 回火（180℃，2h）
	2	① 直接淬火后畸变不符合要求而需用压床或套心棒淬冷的齿轮 ② 渗碳后需进行机械加工的齿轮 ③ 固体渗碳齿轮	渗碳或碳氮共渗→冷却→再加热（850 ~ 870℃）→ 淬冷（油淬或热油马氏体分级淬火）→回火
	3	精度要求较高（7 级）的齿轮	齿轮在渗碳前经过粗加工成形；渗碳后以较慢的冷速冷下来，进行齿形的半精加工；再用高频或中频感应加热装置透热齿部及齿根附近部位进行淬火，回火后再进行齿形的精加工（珩或磨齿）并用推刀精整花键内孔
20、20Cr	4	渗碳齿轮	渗碳后直接淬火，如晶粒较粗大，则宜用序号 2 的热处理工艺进行处理
12CrNi3A 20CrNi3A 12Cr2Ni4A 20CrNi2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA	5	渗碳齿轮	渗 碳（900 ~ 920℃）→ 冷 却 → 再 加 热 [12CrNi3A、20CrNi3A、12Cr2Ni4A、20Cr2Ni4A 为（800 ± 10）℃；18Cr2Ni4WA 为（850 ± 10）℃] → 淬冷 [油或（200 ± 30）℃碱槽，保持 5 ~ 10min 后，空冷] → 冷处理（- 70 ~ - 80℃ × 1.5 ~ 2h）→ 回火

(续)

钢 号	序号	齿 轮 类 型	热处理工艺
12CrNi3A 20CrNi3A 12Cr2Ni4A 20CrNi2Mo 20Cr2Ni4A 18Cr2Ni4WA	6	渗碳后还需进行切削加工的齿轮	渗碳→冷却→高温回火 (650 ± 10) $^{\circ}\text{C} \times 5.5 \sim 7.5\text{h}$, 空冷, 18Cr2Ni4WA 则应随炉冷到 350°C 以下出炉空冷→再加热→淬冷→回火
	7	一般淬火后, 心部硬度过高的齿轮	淬火可按下述规范进行: 18Cr2Ni4WA, (850 ± 10) $^{\circ}\text{C}$ 保温后, 快速放入 $280 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 碱槽中, 保持 $12 \sim 20\text{min}$, 转入 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$ 硝酸盐浴中保持 $30 \sim 50\text{min}$ 油冷 12CrNi3A, $820 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 保温后, 在 (230 ± 50) $^{\circ}\text{C}$ 的碱槽内保持 $8 \sim 12\text{min}$ 后油冷
	8	碳氮共渗齿轮	碳氮共渗 ($830 \sim 850^{\circ}\text{C}$) →直接淬火 (油或碱槽, 马氏体分级淬火, 18Cr2Ni4WA 可用空淬) →冷处理→回火
	9	碳氮共渗后还需进行切削加工的齿轮	碳氮共渗→冷却→高温回火→淬火→回火

齿轮的碳氮共渗主要采用气体碳氮共渗工艺进行, 温度为 $830 \sim 860^{\circ}\text{C}$, 共渗时间与温度、渗层厚度等因素有关, 应根据齿轮的具体技术要求而定, 与渗碳相比具有处理温度低、齿轮变形小、耐磨性好以及渗层可以减薄等特点。碳氮共渗后齿面适宜的碳氮含量见表 4-17。

表 4-17 碳氮共渗后齿面适宜的碳氮含量

常用材料	渗层深度/mm	剥落层厚度/mm	齿面适宜的 C、N 含量 (质量分数, %)	
			C	C + N
20CrMnTi	0.5 ~ 0.7	0.025 ~ 0.050	0.65 ~ 0.90	1.00 ~ 1.25
			0.60 ~ 0.95	1.00 ~ 1.154
20CrMnMo	0.5 ~ 0.8	0.025 ~ 0.050	0.75 ~ 1.00	1.30 ~ 1.60
			0.65 ~ 1.05	1.25 ~ 1.55

另外资料介绍, 齿轮表面渗碳浓度过高会造成碳化物呈网状或聚集成堆, 其原因在于渗碳介质的能力太强, 另外还与温度高和时间长有关。这将会降低齿轮表面层的强度和韧性, 使弯曲疲劳强度下降, 牙齿变脆、易于崩裂等, 直接影响到齿轮的使用寿命, 具体见表 4-18。

表 4-18 齿轮牙齿表面层碳浓度对其弯曲疲劳寿命的影响

组别	脉动弯曲疲劳寿命/ ×10 ⁴ 次	渗层深度/mm		硬度 HRC		金 相 组 织	
		共析层	总渗层	表面	心部	表面	心部
1	18. 1	0. 75	1. 35	62	32	M + 少量 A + 少量碳化物	低碳马氏体
2	8. 34	1. 20	1. 75	59	30. 5	M + 较多 A + 网状碳化物	

汽车齿轮的碳氮共渗是在 830 ~ 860℃ 温度下进行的, 由于比渗碳温度低 80 ~ 100℃, 因此减小了热处理后的变形, 同时硬化层厚, 适宜制作承受重载荷的齿轮, 一般采用深层渗碳 (2. 5 ~ 8mm)、淬火和回火工艺, 不采用低温化学热处理工艺。20CrMnMo、20CrMnTi 钢制作的齿轮, 经碳氮共渗后弯曲疲劳强度高于 12CrNi3A 钢渗碳淬火工艺处理的齿轮。表 4-19 为几种常用汽车齿轮碳氮共渗工艺规范及处理结果。

表 4-19 几种常用汽车齿轮碳氮共渗工艺规范及处理结果

碳氮共渗的温度/℃	保温时间/h	渗层厚度/mm	淬火硬度 HRC
830 ~ 860	3	0. 25 ~ 0. 50	56 ~ 62
	6	0. 50 ~ 0. 70	
	8	0. 70 ~ 0. 90	
	10	0. 90 ~ 1. 10	
	13	1. 10 ~ 1. 30	

(4) 齿轮渗碳及碳氮共渗后热处理畸变的产生原因与热处理缺陷及防止措施 齿轮经过渗碳和碳氮共渗后需要进行最后的热处理, 在淬火和回火过程中表面成分改变, 淬火后组织应力和热应力的共同作用, 将使齿轮的某些尺寸发生一定的变化, 个别的会造成畸变现象, 这会直接影响齿轮的产品质量, 因此找出产生的原因, 并采取一定的措施, 是热处理工作者的职责和任务。齿轮渗碳及碳氮共渗后热处理畸变的产生原因见表 4-20。渗碳和碳氮共渗齿轮常见热处理缺陷及防止措施见表 4-21。

表 4-20 齿轮渗碳及碳氮共渗后热处理畸变的产生原因

影 响 因 素	造成齿轮畸变的原因
材料的影响	① 晶粒度不均匀
	② 带状组织偏析严重
锻造	① 锻造流线不对称
	② 锻后冷却不均匀

(续)

影 响 因 素	造成齿轮畸变的原因
预备热处理	① 加热温度过高或过低 ② 冷却不均匀
最终热处理	① 加热温度不均匀 ② 夹具设计不合理 ③ 冷却介质及冷却方法选择不当 ④ 渗层质量不均匀
零件的设计	① 形状对称性及截面均匀性差 ② 轮辐刚度差
切削加工	① 机械加工余量过大 ② 工艺孔位置安排不当

表 4-21 渗碳和碳氮共渗齿轮常见热处理缺陷及防止措施

缺 陷 名 称	产生的原因	防止措施
毛坯硬度偏高或偏低	① 正火温度低或保温时间短，冷却速度慢 ② 正火温度过高	重新制订合理的正火工艺，检查仪表，控制冷却速度
带状偏析	钢材内合金元素和杂质偏析	更换材料
渗层过深或过浅	① 炉内碳势过高或过低 ② 炉内温度偏高或偏低 ③ 强渗时间长或短	① 控制炉内气氛 ② 调整到要求的温度 ③ 合理确定强渗时间
渗层不均匀	① 炉内温度不均匀 ② 炉内碳量不均匀 ③ 炉内气氛循环不良 ④ 工件之间有压叠或碰撞 ⑤ 齿面有脱碳或锈迹	① 加导流罩确保温度均匀 ② 严格控制炉内碳量 ③ 减少装炉量和合理放置，确保气氛的循环 ④ 对齿面除锈或去掉脱碳层
1) 表面碳浓度过高形成大块碳或渗氮物网 2) 表面碳浓度低	1) 表面碳浓度过高的原因有： ① 炉内碳势高 ② 强化时间过长 2) 表面碳浓度低的原因有： ① 炉内碳势过低 ② 扩散时间长 ③ 炉温偏高	1) 降低表面碳浓度的措施有： ① 降低炉内碳含量 ② 缩短强渗时间 ③ 适当提高淬火温度 ④ 可补充一次较低碳含量的扩散处理 2) 提高表面碳浓度的措施有： ① 提高炉内碳含量 ② 检查炉温使其符合要求 ③ 调整强渗与扩散时间的比例

(续)

缺陷名称	产生的原因	防止措施
1) 表面马氏体针粗大 2) 出现非马氏体组织	1) 晶粒粗大的原因因为淬火温度高 2) 产生非马氏体组织原因有： ① 排气不充分 ② 炉子密封性差、严重漏气 ③ 表面氧化 ④ 冷却速度慢	1) 降低淬火温度 2) 防止产生非马氏体组织的措施有： ① 充分排气 ② 减少空气的进入 ③ 在可控气氛炉中加热 ④ 提高冷却速度
表面脱碳	① 渗碳后出炉温度高 ② 炉子密封性差、严重漏气 ③ 淬火过程中产生氧化	① 降低出炉温度 ② 防止漏气，控制炉内气氛 ③ 盐浴淬火时充分脱氧 ④ 重新进行渗碳或碳氮共渗
心部硬度低	① 淬火温度低 ② 冷却速度慢 ③ 心部游离态铁素体过多 ④ 材料选择不当	① 调整加热温度 ② 提高冷却速度 ③ 采用两次淬火 ④ 更换材料
畸变	① 淬火温度偏高 ② 冷却方法不当 ③ 夹具、挂具设计不合理 ④ 材料选择不当	① 调整淬火温度 ② 选择合理的淬火冷却介质和方法 ③ 设计符合要求的夹具等 ④ 更换材料

5. 齿轮的火焰淬火、高频感应淬火和整体热处理

经渗碳或碳氮共渗后的齿轮，应进行淬火和回火处理，这样才能获得要求的力学性能和表面硬度，满足齿轮在不同条件下工作的需要，采用普通的整体热处理尽管能达到要求，但其存在耗能大、变形量难以控制、操作复杂等缺点，例如盐浴炉、可控气氛炉、电阻炉、流动粒子炉等，因此齿轮的热处理目前倾向于采用表面淬火，这种方法既能保证产品的质量，又能节约大量的能源，同时降低了缺陷发生的概率，具有广阔的发展前景。

(1) 火焰淬火 其主要的工艺参数介绍如下：淬火加热温度为 $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ；乙炔与氧气的用量比为 1: (1.150 ~ 1.5)，呈蓝色中性火焰；齿面淬火时焰心与零件的距离为 5 ~ 10mm，沿齿沟淬火时为 2 ~ 3mm；火焰喷嘴或零件的移动速度一般为 50 ~ 300mm/min；喷水孔与火焰孔距离为 15 ~ 25mm；冷却介质通常为自来水（压力为 $1 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ）、聚合物水溶液、乳化液以及压缩空气等；回火温度依据硬度的要求而定，要求硬度为 45 ~ 50HRC 时温度为 200 ~ 250℃，要求 50 ~ 55HRC 时采用 180 ~ 220℃回火，回火时间控制在 45 ~ 90min 范围内。

(2) 感应淬火 感应淬火可得到比普通淬火硬度稍高的表层，保持心部的强度和韧性，由于加热时间短，同时减少了齿轮加热时表面的氧化和脱碳。通常齿轮

进行感应淬火处理的方法有几种类型,即全齿回转加热淬火、单齿感应淬火、沿齿沟感应淬火等,齿轮淬火方法的选用应根据齿轮直径的大小、具体的技术要求、材料的类别等几个方面来考虑。

出于生产率的考虑和汽车齿轮零件的特点,汽车齿轮感应淬火不采用沿齿沟的单齿淬火工艺,而主要采用整体加热淬火工艺,整体淬火又分为单频淬火和双频淬火。双频淬火技术可以得到更好的仿形淬硬层,对于提高齿轮疲劳强度、减小淬火变形等非常有利;单频淬火得到的硬化层仿形效果相对差些。图 4-3 和图 4-4 显示了它们的淬火硬化层差别。但并非双频淬火一定比单频淬火好,对于小模数齿轮,为获得更高的强度,往往需要将齿部完全淬透,并且在齿根以下得到一定深度的淬硬层。汽车齿轮感应淬火应用最普遍的是发动机飞轮齿圈,绝大多数齿圈采用感应淬火。东风公司已经在一些变速器齿轮上实现了感应淬火,用价格便宜的中碳合金钢替代价格高的渗碳齿轮钢。

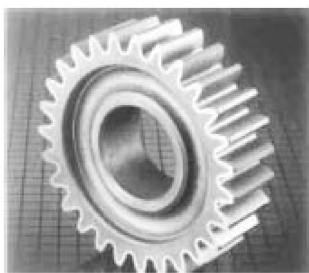


图 4-3 齿轮双频淬火

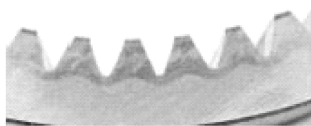


图 4-4 齿轮单频淬火

1) 全齿回转加热淬火。将齿轮放在转盘上旋转运动,同时进行高(或中)频感应加热,待整个齿轮表面达到淬火温度后立即喷水或浸入水中快速冷却,以获得要求的力学性能。常用齿轮感应淬火频率的选择见表 4-22。根据硬化层深度和频率、齿轮模数的关系可进行合理地选择,确定理想的频率和硬化深度,来满足齿轮的工作需要。

表 4-22 常用齿轮感应淬火频率的选择

频率/kHz	硬化层深度/mm			齿轮模数 m /mm
	最小	适中	最大	
250 ~ 300	0.8	1 ~ 1.5	2.5 ~ 4.5	1.5 ~ 5 (2 ~ 3 最佳)
30 ~ 80	1.0	1.5 ~ 2.0	3 ~ 5	3 ~ 7 (3 ~ 4 最佳)
8	1.5	2 ~ 3	4 ~ 6	5 ~ 8 (5 ~ 6 最佳)
2.5	2.5	4 ~ 6	7 ~ 10	8 ~ 12 (9 ~ 11 最佳)

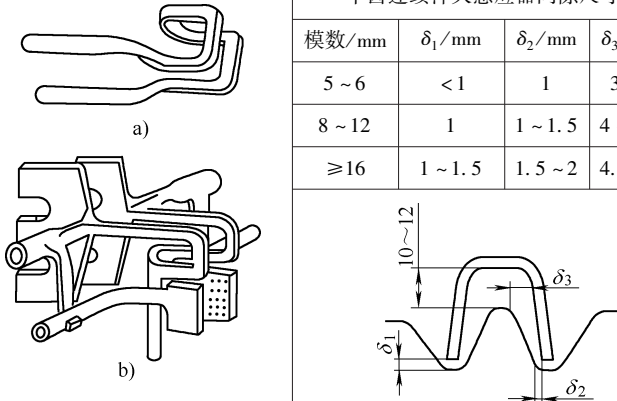
齿轮选用的钢材成分直接影响到感应加热的温度，实践证明钢中含碳量的高低对感应加热温度有很大的影响，见表 4-23。

表 4-23 钢材的含碳量和合金元素对感应加热温度的影响

钢中碳的质量分数（%）	加热温度/℃	合金元素的作用
0.30	900 ~ 925	含 Cr、Mo、Ti、V 等碳化物形成元素的合金钢需在相应碳素钢淬火温度的基础上提高 40 ~ 100℃
0.35	890 ~ 910	
0.40	870 ~ 900	
0.45	970 ~ 900	
0.50	860 ~ 880	

2) 单齿感应淬火。大型齿轮实现全齿加热淬火十分困难，齿面内外的温差大，容易造成齿顶端过热，而齿面温度未达到淬火温度的情况，无法满足齿轮感应淬火的要求，而单齿感应淬火则有效地解决了该问题。一般单齿连续加热感应器的结构尺寸见表 4-24。

表 4-24 一般单齿连续加热感应器的结构尺寸

感应器简图	结 构 尺 寸				说 明
	单齿连续淬火感应器间隙尺寸				① 淬火冷却装置有自喷式（图 a）和附加冷却器（图 b）两种 ② $m = 5 \sim 10\text{mm}$ 的齿轮，喷液孔应低于齿顶 $1.5 \sim 2\text{mm}$，以防齿顶因冷却过激而产生开裂 ③ $m > 10\text{mm}$ 的齿轮，喷液孔则应高于齿顶 $1.5 \sim 2\text{mm}$，以保证齿顶能够淬硬
	模数/mm	δ_1 /mm	δ_2 /mm	δ_3 /mm	
	5 ~ 6	< 1	1	3 ~ 4	
	8 ~ 12	1	1 ~ 1.5	4 ~ 4.5	
	≥ 16	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	4.5 ~ 5	

通常该类感应器的淬火冷却装置有自喷式和附加冷却器两类，对齿面加热后迅速冷却，需要注意的是要防止出现齿顶过热现象。单齿连续感应淬火的加热工艺参数见表 4-25。

表 4-25 单齿连续感应淬火的加热工艺参数

齿轮模数/mm	功率/kW	栅极电压/kV	阳极电流/A	栅极电流/A	移动速度/ (mm/s)
5	18 ~ 20	8 ~ 8.5	2.5	0.6	5 ~ 6
6	20 ~ 27	8.5 ~ 9	2.5	0.6	4 ~ 5
8 ~ 9	25 ~ 33	9 ~ 9.5	3.5	0.8	4 ~ 5
10	33 ~ 35	10 ~ 11	3.5	0.8	4 ~ 5
12	34 ~ 40	11 ~ 11.5	3.5	0.8	3 ~ 4
16	40 ~ 45	11 ~ 11.5	3.5 ~ 4	0.8	3 ~ 4
18	45 ~ 50	11.5 ~ 12	4 ~ 5	0.8 ~ 1	3 ~ 4

3) 沿齿沟感应淬火。大型齿轮除了单齿感应淬火外,沿齿沟感应淬火同样可以满足对齿轮淬火的要求,感应器通常作成 V 形,其特点是该感应器与齿沟轮廓仿形,高度为 6 ~ 8mm,导磁体高 10 ~ 12mm。多用于模数为 6 ~ 14mm 的齿轮的淬火。V 形感应器沿齿沟淬火的工艺参数见表 4-26。

表 4-26 V 形感应器沿齿沟淬火的工艺参数

齿轮模数 <i>m</i> /mm	材料	功率 /kW	电压 /V	电流 /A	感应器移 动速度/ (mm/s)	淬火冷却介质 (质量分数)		表面硬度 HRC
10	40Cr	18	375	25	2.7 ~ 3	PAG 溶液	8%	45 ~ 50
	40CrNiMo	18	375	25	2.7 ~ 3		12%	50 ~ 55
12	45	30	600	75	3 ~ 3.4	水	25 ~ 30℃	40 ~ 45
	40Cr	30	600	75		PAG 溶液	8%	45 ~ 50
	40CrNiMo	30	600	75			12%	50 ~ 55
14	40Cr	30	600 ~ 610	75			8%	45 ~ 50
	40CrNiMo	30	600 ~ 610	75			12%	50 ~ 55
16	40Cr	18	500	75	2.8	PAG 溶液	8%	45 ~ 50
18	40Cr	30	600	75	2.9		12%	45 ~ 50

常用 II 形感应器的结构示意图如图 4-5 所示,其常用于齿沟的淬火,淬火方法与 V 形感应器相似,具体淬火工艺参数见表 4-27。

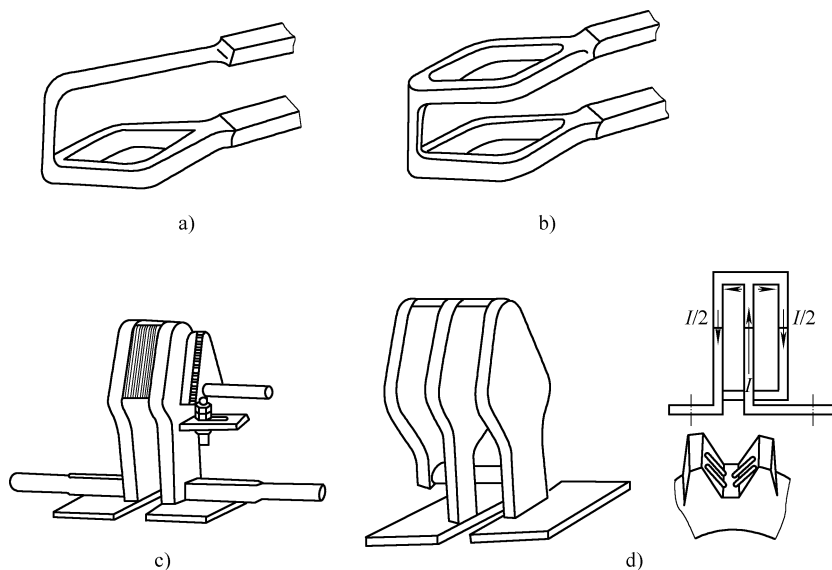


图 4-5 常用Ⅱ形感应器的结构示意图

- a) 适用于 $m < 6\text{mm}$ 齿轮，超音频电源 b) 适用于 $m = 6 \sim 12\text{mm}$ 齿轮，超音频～中频（8kHz）电源
c) 适用于 $m > 10\text{mm}$ 齿轮，中频（8kHz、2.5kHz）电源 d) 适用于 $m > 10\text{mm}$ 齿轮，中频电源
（其特点为上、下两加热导板分流（ $I/2$ ）后，可改善加热效果，尤其可防止感应器移动出齿沟时造成的端面过热）

表 4-27 Ⅱ形感应器沿齿沟淬火的工艺参数

齿轮模数 /mm	钢号	功率/kW	电压/V	电流/A	感应器移 动速度 /(mm/s)	淬火冷却 介质	表面硬度 HRC
14	ZG270-500	65	580	125	5	水 25 ~ 30℃	45 ~ 50
20	ZG351CrMo	50	350	155	7	5% ~ 15% (质量分数) 聚合物 (PAG) 水溶液	50 ~ 55
26	ZG35Mn	100	500	210	6.5		
26	ZG351CrMo	60	380	165	7.5		
26	35CrMo	50	350	155	7.5		

（3）齿轮的表面淬火畸变和需采取的措施 齿轮经过高频感应淬火或火焰淬火后，将会发生尺寸的改变，严重的会造成报废，直接影响到产品质量。减小齿轮表面淬火畸变的措施见表 4-28。

表 4-28 减小齿轮表面淬火畸变的措施

措 施	合理的工艺方法
合理选用材料及其淬透性	选用高淬透性材料
消除毛坯内应力、细化组织	毛坯正火
采用较低的淬火温度或亚温压床淬火工艺	淬火前进行调质处理，获得均匀细小的索氏体组织
合理控制正火显微组织、晶粒度与硬度	① 正火 + 高温回火 ② 等温正火
改进预备热处理工艺（一次正火工艺）	① 锻造后余热正火淬火，获得较为均匀的粒状珠光体 ② 锻造后余热正火处理
短时间内加热	① 淬火前进行调质处理 ② 选择合适的感应加热频率 ③ 火焰喷嘴或感应器与齿面间距不宜过大 ④ 淬火前进行预热处理
消除加工应力	表面淬火前经过 600 ~ 650℃ 预热
加热均匀	① 心轴的偏摆小 ② 火焰喷嘴或感应器的形状均匀对称 ③ 套筒加热时齿轮旋转
缓和淬火冷却介质	① 采用合适的淬火冷却介质（油类） ② 尽可能采用自来水 ③ 采用聚合物水溶液
提高齿轮本身的强度	① 合理安排加工顺序 ② 结构设计应合理

(4) 齿轮表面淬火后常见的质量缺陷和防止措施（表 4-29）

表 4-29 齿轮表面淬火后常见的质量缺陷和防止措施

缺 陷 名 称	产 生 原 因	防 止 措 施
畸变（内孔、外圆、齿形等）	① 加热规范不当 ② 冷却过于激烈 ③ 加热冷却不均匀 ④ 原始组织不均匀	① 调整加热规范，进行预热处理 ② 选择合适的淬火冷却介质 ③ 保证加热和冷却均匀 ④ 改善原始组织（毛坯正火、去应力退火、调质处理等）
表面硬度过高或过低	① 钢材本身含碳量偏高或偏低 ② 预备热处理组织不良 ③ 淬火加热温度不当 ④ 冷却不均匀 ⑤ 回火温度和时间选择不当	① 检查钢材的含碳量，首件检查调整工艺参数 ② 选用合理的淬火冷却介质 ③ 喷液淬火，调节压力、流量和温度 ④ 浸液淬火，有循环装置 ⑤ 选择合理的回火规范

(续)

缺陷名称	产生原因	防止措施
表面硬度 不匀	① 火焰喷嘴或感应器的结构不合理 ② 钢材有带状偏析 ③ 局部脱碳 ④ 加热和冷却不均匀	① 改进设计 ② 预备热处理确保组织均匀 ③ 表面无油污、锈迹，淬火冷却介质清洁 ④ 加热温度均匀，喷水孔分布合理，孔无堵塞
硬化层浅	① 加热时间短，感应加热频率过高 ② 火焰强度过高 ③ 钢材的淬透性差 ④ 冷却方法选择不当	① 选择合理的加热频率，确保硬化层深度 ② 调整火焰的强度 ③ 改变冷却条件 ④ 选择合理的冷却方式
淬火开裂	① 淬火温度过高 ② 冷却过于激烈 ③ 局部（齿顶端）过热 ④ 钢材的含碳量低 ⑤ 成分偏析 ⑥ 材料有缺陷 ⑦ 回火不充分 ⑧ 齿根圆角尖锐	① 严格控制淬火温度 ② 选择冷却速度低的淬火冷却介质 ③ 调整电参数 ④ 检查钢材质量 ⑤ 进行调质处理或正火处理 ⑥ 更换无缺陷的材料或进行必要的预备热处理 ⑦ 减小齿顶或端面的冷却速度，及时回火 ⑧ 加大齿根圆角，沿齿沟采用隔齿淬火的方法

6. 齿轮的热处理操作要点与工艺分析

- 1) 渗氮齿轮的预备热处理有正火和调质两种工艺，正火适用于中碳钢，而调质大多是中碳合金钢的处理方式，渗氮前的去应力退火的目的是消除加工应力、稳定尺寸，为最终渗氮做好准备。考虑到相变点的温度对渗氮质量的影响，去应力退火温度应高于渗氮温度 20 ~ 30℃，同时要低于调质温度，这样才能确保齿轮的基体强度和硬度符合技术要求。
- 2) 对于渗碳或碳氮共渗齿轮，为减少变形应选用合理的淬火工夹具，使渗碳件在渗碳过程中温度均匀、不受外力的作用，并且使渗碳气氛合理流动。选用较低的淬火温度或冷却能力较缓的淬火冷却介质，也可采用分级、等温等淬火方法，降低应力和减小变形。控制齿轮花键孔的精度，采用模压淬火。
- 3) 全齿回转加热淬火的冷却一般根据材料的淬透性选择 20 ~ 50℃ 的水、质量分数为 15% ~ 20% 的乳化液或 40 ~ 80℃ 的热油等作为淬火冷却介质，而回火通常采用炉内回火，可确保齿轮的淬火组织充分转变，防止其开裂。
- 4) 沿齿沟感应淬火的淬火冷却介质一般按如下规定选取：碳素钢用自来水冷却，合金钢用质量分数为 10% ~ 15% 的乳化液、质量分数为 5% ~ 15% 的 PAG 聚

合物水溶液、喷雾或压缩空气等。冷却器的结构为：喷水的孔径为 0.6 ~ 0.8mm，孔间距为 2 ~ 2.5mm，喷射角为 30° ~ 45°，喷水孔应交错排列，以确保水冷均匀。

4.2.2 球墨铸铁齿轮的热处理

球墨铸铁齿轮的热处理主要包括消除应力的低温退火、低温石墨化退火、高温石墨化退火、正火、淬火 + 回火、等温淬火、表面淬火和化学热处理等。球墨铸铁齿轮常用的热处理工艺见表 4-30。

表 4-30 球墨铸铁齿轮常用的热处理工艺

热处理 工艺类型	热处理的目的	工 艺 举 例	基 体 组 织	备注
去应力退火	① 使珠光体分解 ② 提高塑性和韧性	700 ~ 760℃ × 3 ~ 6h，炉冷至 600℃ 出炉空冷	F	铸态 无游离 态的渗 碳体
等温退火	① 消除白口和游离渗碳体 ② 使珠光体分解，改善切削加工性 ③ 提高塑性和韧性	920 ~ 980℃ × 2 ~ 5h，炉冷至 700 ~ 750℃，保温 3 ~ 6h 炉冷至 600℃ 出炉空冷	F	
正火	① 提高组织的均匀性、强度、硬度和耐磨性 ② 消除白口和游离渗碳体	880 ~ 950℃ × 1 ~ 3h 空冷或风冷	P + 少量 F（牛眼状）	重要 铸件正 火后要 回火
正火	获得良好的韧性和强度	840 ~ 880℃ × 1 ~ 2h 空冷或风冷	P + F（块状）	
两次正火	① 提高组织均匀性、强度、硬度和耐磨性等 ② 消除白口及游离渗碳体 ③ 防止出现二次渗碳体	920 ~ 980℃ × 1 ~ 3h，炉冷至 860 ~ 880℃，保温 1 ~ 5h 空冷	P + 少量 F（牛眼状）	
高温不保温 直接正火	获得良好的强度和韧性	740 ~ 760℃ × 1 ~ 1.5h 后直接升温到 900 ~ 940℃，不保温直接空冷或风冷	P + F（块状）	

(续)

热处理 工艺类型	热处理的目的	工 艺 举 例	基 体 组 织	备注
淬火和回火	提高强度、硬度和耐磨性	860 ~ 900℃ × 30min, 油冷后回火: ① 550 ~ 600℃ × 1 ~ 3h ② 250 ~ 350℃ × 1 ~ 3h ③ 200 ~ 250℃ × 1 ~ 3h	① S _回 + A' ② M _回 + T _回 + 少量 A' ③ M _回 + 少量 A'	淬火前先进行正火处理
贝氏体等温淬火	提高强度、韧性、硬度和耐磨性	850 ~ 900℃ × 30min, 等温淬火: ① 350 ~ 380℃ × 1h ② 260 ~ 280℃ × 1h ③ 230 ~ 240℃ × 1h	① B _上 + A' ② B _下 + A' ③ B _下 + M + A'	铸态组织中应无游离态的渗碳体

4.2.3 齿轮的表面强化处理

武智弘曾提出的改善齿轮齿根强度的措施见表 4-31，改善齿轮表面强度的措施见表 4-32。

表 4-31 改善齿轮齿根强度的措施

项 目	概 念	作 用	
内在质量设计构想	降低渗层反常组织	降低渗层氧化的元素	提高 Si、Mn、Cr 含量
		添加非氧化和促进淬透性的元素	提高 Ni、Mo 含量
	强化晶界	减少增大晶界脆性的元素	降低 P、Mn 含量
		添加强化晶界的元素	提高 Mo、B 含量
	清洁度	减少和细化夹杂物	降低 O 含量细化 MnS
	残留奥氏体	用常规渗碳条件控制残留奥氏体	提高 Mo 含量
表面处理	压缩应力	喷丸	喷丸处理
	C 质量分数、晶粒大小控制	复合热处理	渗碳 + 高频感应淬火

表 4-32 改善齿轮表面强度的措施

项 目	相 关 概 念	作 用	
设定的措施和参量	防止表面温度升高的措施	软化抗力提高	提高 Si、Cr 含量
		增大高温下的硬度	Si 增加，可提高弥散的 VC 碳化物效果
表面处理	残留奥氏体	通过残留奥氏体转变增大硬度	渗碳和渗氮
	增大压力和硬度	喷丸	硬度和多步喷丸
	碳化物弥散	在渗碳时碳化物沉淀	具有 C 增加，可提高的渗碳处理效果

齿轮经磨齿后，为了提高齿轮的强度、耐磨性以及齿轮的使用寿命，必须对齿轮的齿面进行强化喷丸处理。可采用压缩空气或离心式喷丸机，所用钢丸或铸铁丸的直径为 0.5 ~ 1mm，处理后的硬度为 48 ~ 55HRC。齿面喷丸是将齿轮吊挂在悬链上面进行的，喷丸时间为 4 ~ 10min，钢丸在压缩空气或离心力作用下以 50 ~ 70m/s 的高速喷射齿轮，齿轮表面产生了残余压应力，使表面得到了明显强化，试验证明齿轮经强化喷丸后，使用寿命提高 1 倍以上，见表 4-33。齿轮的齿根喷丸强化后明显提高了弯曲疲劳强度，其原因在于齿轮的表层形成了有利的残余压应力。需要注意的是对汽车齿轮进行喷丸处理后，如果喷丸工艺不当、铸铁或钢丸粒度不对、时间过长等，将会造成齿顶、齿尖产生崩落。

表 4-33 喷丸工艺对变速器渗碳齿轮弯曲疲劳及接触疲劳性能的影响

喷 丸 工 艺	弯曲疲劳试验			接触疲劳性能试验		
	寿命范围/× 10 ⁶ 周次	平均寿命/× 10 ⁶ 周次	寿命比	寿命范围/× 10 ⁶ 周次	平均寿命/ ×10 ⁶ 周次	寿命比
不喷丸	0.167 ~ 0.83	0.75	1.00	3.15 ~ 4.41	3.85	1.00
一般喷丸	2.16 ~ 2.76	2.46	3.28	1.88 ~ 2.21	2.08	0.54
强化喷丸	2.19 ~ 4.41	3.24	4.32	4.89 ~ 5.20	5.06	1.31

注：该喷丸在转台喷丸机上进行，铁丸直径在 0.6 ~ 1.0mm 范围内，喷射速度为 58.3m/s，每转一周转动 90°，一般喷丸转 4 圈，强化喷丸为 8 圈。

4.2.4 齿轮制造过程中常见缺陷及其原因分析

(1) 淬火开裂 原因是牙齿心部的硬度过高或过低、渗层中碳浓度过高或过低、渗层厚度不均、回火不及时等。

(2) 磨削开裂 原因是磨削工艺不当或磨料不良、渗碳层过厚、有网状碳化物、残留奥氏体过多，这多半与齿轮的热处理工艺和选材不当有关，同时也与冶

金、冷加工、热加工等有一定的关系。

磨削产生的表面裂纹呈网状、放射状、分散条状,与磨削方向垂直,横向剖开后可见裂纹分布于表面层中,并随深度的增加而逐渐消失,图4-6所示为磨削时产生的放射状裂纹,从图中可以看出裂纹自晶界蜿蜒分布。齿轮经渗碳淬火回火后,在表层组织中存在一定数量的残留奥氏体,砂轮的磨削量过大,冷却不良,使表面的温度升高,残留奥氏体转变为马氏体组织,出现表层局部的膨胀,同时又会出现新的组织应力和热应力作用。加上表面马氏体受热成为托氏体,产生的磨削应力超过了基体的抗拉强度,故形成了表面的裂纹。



图4-6 磨削时产生的放射状裂纹

(3) 切削加工困难 原因是切削工艺不当、有大块非金属夹杂物、出现粒状B、珠光体球化等。

(4) 锻造开裂 原因是原材料缺陷或工艺不当出现折叠、沿晶界分布的铁硫共晶体出现疏松、沿晶界分布着铜基含铁 ε 相固体、过热或过烧等。

4.2.5 齿轮在使用过程中的损坏形式和特征

汽车用齿轮从变速器换挡齿轮,到后桥或减速器齿轮,均在高载荷作用下工作。齿面在弯曲载荷的作用下,将产生疲劳损坏。牙齿因为承受较大的接触应力和摩擦力,会形成疲劳麻点或深层剥落,换挡齿轮在多次、连续冲击的作用下,出现齿端磨损或崩落等现象,常见损坏形式有七种。

(1) 麻点剥落(或麻点磨耗) 在汽车齿轮中,它是啮合齿轮失效的主要原因,其表现形式为节线附近有点状针孔,也有的呈小的贝壳状或椭圆状等,麻点以两种形式存在,一种出现在初期,使用一段时间后被磨光、消失;另一种是长时间的发展性麻点剥落,逐渐扩大造成大片的剥落或成凹槽(坑)。

这是接触疲劳损坏的一种主要形式,在接触应力和摩擦应力的反复作用下,齿轮的表面产生塑性变形,最终产生疲劳裂纹。存在大块网状碳化物,有非马氏体组织和托氏体存在以及齿面脱碳等因素的存在将造成齿轮的早期失效。具体剥落过程如图4-7所示。

(2) 深层剥落 它是表面硬化层的剥落,其原因在于齿轮的心部硬度低,而硬化层深度不足,加上个别牙齿的局部过载。图4-8所示为锥齿轮的齿面深层剥落,图中齿轮材料为15CrMnMo,表面为粗大的针状马氏体+残留奥氏体,心部是索氏体+大量的铁素体,经分析认为产生深层剥落的原因因为错用材料以及淬火工艺不当。齿轮的心部未淬透,在渗碳过渡区形成了较大的残留拉应力,表面产生塑性

变形,如图4-9所示,硬度检验表明,牙齿的表面硬度为58~59HRC,而心部只有29~30HRC,其硬度的变化曲线如图4-10所示。在剪切应力的反复作用下,产生了疲劳裂纹。

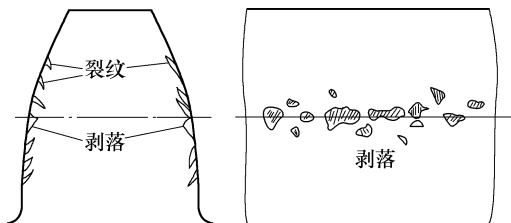


图4-7 齿面麻点剥落发展过程示意图



图4-8 锥齿轮的齿面深层剥落

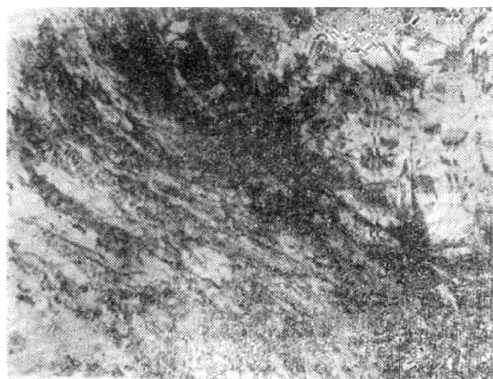


图4-9 剥落层、裂纹和塑性变形的心部组织

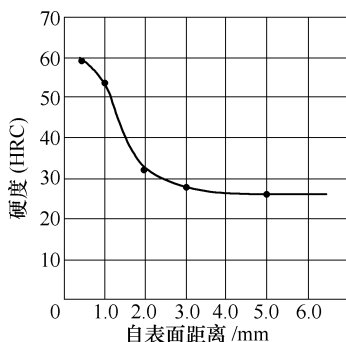


图4-10 牙齿表面至心部的硬度变化曲线

(3) 疲劳断裂 齿轮牙齿的疲劳断裂是长期脉动弯曲应力作用的结果,一般发生于齿根处,此处危险截面上受到的弯曲应力最大,当其超过该处的金属弯曲疲劳强度后,在交变应力的反复作用下会形成疲劳裂纹,经过一定时间后渐渐发展和扩大,到一定的程度牙齿产生断裂,与齿轮脱离。通过对断面的分析可知断口分为两个区域即疲劳区和脆断区,前者平坦、光滑,具有疲劳源和贝纹线,疲劳源产生于齿根圆角或刀痕处,个别存在于硬化层下面的过渡区,后者呈晶粒状或纤维状。

造成齿轮疲劳断裂的原因较多,与零件热处理有关的因素如下:

① 牙齿表面存在抗疲劳性能较低的组织,严重降低了齿轮的使用寿命,如过量的残留奥氏体、非马氏体组织、网状碳化物等。

② 渗碳层过厚或过薄、渗碳层与心部之间过渡区的硬度变化陡峭,造成齿轮

内外结合强度的降低。

③ 表面存在裂纹,如淬火时冷速过快或加热温度过高,将造成局部的开裂;在后续的磨削加工过程中,磨削操作不当或热处理后未及时回火等,也会造成裂纹的出现。

④ 齿轮热处理后变形大,使齿轮牙齿接触区域的环境明显变差,造成牙齿局部过载,发生早期的疲劳断裂。

(4) 脆性断裂 该类失效是外加载荷突然增加或牙齿之间落进其他物体,致使牙齿所承受的弯曲应力超过了材料的强度极限而造成的牙齿断裂。其特征为:无疲劳区。呈晶粒状或纤维状;心部硬度偏高时,渗碳层中存在大量的网状碳化物,断口为凹形;硬度偏低时,齿轮强度降低,牙齿的断裂呈塑性损坏,此时断口呈凸形。该类断裂通常与硬化层过深或牙齿心部硬度过高有关。

(5) 磨损与胶合 相互接触的齿轮两齿面间除了存在纯滚动外,还具有相对的滑动,即要承受摩擦应力的作用,因此提高了磨损的速度,一般正常的磨损速度比较缓慢。但当硬的质点或物体进入两相互啮合的齿面之间时,将起到剧烈研磨剂的作用,造成磨粒磨损。

胶合磨损也称拉毛,其表现形式为表面粗糙不平,存在与滑动方向一致的沟槽,个别有烧伤等。其原因在于齿轮在工作过程中承受过大的接触应力和摩擦应力时,齿面将会产生金属塑性变形,或者齿面间润滑不良、润滑油极限油膜被破坏,造成金属之间裸露接触,啮合表面在高温高压下首先相互粘着,而后又被撕开,最终接触的部位出现胶合现象,齿轮失去原有的精度和尺寸,无法正常传递动力。该类磨损出现在高速齿轮中,在高速、高压下齿面相对运动,同时摩擦生热。因此除产生塑性变形外,该处的显微组织也发生变化。金相分析表明齿面接触的部位外层会有白亮带(硬度为700~800HV),为二次淬火组织。胶合磨损撕裂裂纹与平面平行,其厚度与白亮层相等。

(6) 齿端磨损 换挡齿轮变速时,齿端部位之间相互撞击,造成局部的磨损。通常渗碳层中马氏体粗大或存在网状的碳化物,在齿轮彼此之间撞击载荷的作用下,硬化层崩裂,从而加速了齿端的磨损。另外牙齿的心部硬度低,齿轮的基体强度不足,冲击载荷将使过渡区的组织产生塑性变形,出现表面金属的滑移,故渗碳层剥落。如果从硬化层到心部过渡区硬度陡降,同样会造成齿端的磨损。

(7) 齿顶磨损 齿轮牙齿齿端的剧烈撞击将造成齿角、齿顶的崩落,尤其是在齿角、齿面存在堆积块状或网状的碳化物,或者材料的晶粒度过于粗大时,硬度低、强度明显不足等,更容易造成齿顶的快速磨损。

4.3 万向传动装置的热处理

4.3.1 十字轴的热处理

普通汽车的万向节通常是由万向节叉、十字轴和轴承等零件组成的，具体构造如图 4-11 所示，它由十字轴 4、万向节叉 2 和 6、毛毡油封 7、滚针 8、滚针轴承钢套 9、轴承支承片 1 和轴承螺钉等零件组成，十字轴内有油道与十字轴油嘴 3 相通，可实现轴承的润滑。普通万向节工作时，两端节叉可同时绕十字轴颈的轴线转动，因此运动灵活。

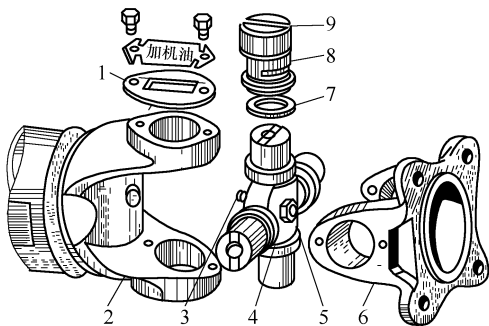


图 4-11 普通万向节结构

- 1—轴承支承片 2、6—万向节叉 3—十字轴油嘴
4—十字轴 5—十字轴安全阀 7—毛毡油封
8—滚针 9—滚针轴承钢套

1. 十字轴的技术要求

十字轴是汽车万向节中十分重要的部件，为万向节的接头，用在汽车传动轴的两端，也可用在转向部分，通常采用低碳合金钢渗碳淬火，如 20CrMnTi 或 20MnVB 钢渗碳处理，最后经机械加工而成，使用寿命为 3×10^4 km 左右。其失效形式为疲劳磨损、磨粒磨损和氧化磨损等，因此对十字轴而言，提高其表面硬度和心部保持良好的韧性，是减缓表面磨损的有效措施之一。

2. 十字轴的加工流程

目前国内大多数企业采用模锻工艺制造十字轴，其工艺流程大致为：下料→加热→锻造→去飞边→正火处理→喷丸或抛丸→车端面、钻中心孔→仿形加工→渗碳→热处理→磨外圆及端面→清洗除油→包装入库。而国外如日本在 20 世纪 80 年代开发了闭塞冷挤压十字轴工艺，与我国的热锻模成形工艺相比，提高了原材料的利用率，工序短，劳动条件好，生产率高，该工艺是将坯料放进型腔中，上下凹模合严后，从中心挤向冲头，毛坯被挤出十字轴的零件形状。20CrMnTi 或 20MnVB 材料塑性好，在挤压过程中易于发生变形，向四周作横向移动，此时的变形阻力不大，材料的流动是按正挤压规律变化的。其冷挤压工艺的流程如下：切断→退火和喷丸→润滑处理（磷化、皂化）→闭塞成形→车端面、钻中心孔→渗碳→热处理→磨外圆及端面→清洗除油→包装入库。

闭塞冷挤压十字轴工艺的挤压方式有两种：一种压力机为双动结构，既可压紧

凹模又可挤入冲头；另一种是模架具有上下凹模合严的功能，由压床压力挤入冲头成形。可以看出该工艺材料的利用率几乎为 100%，是模锻无法达到的。作为一种先进的工艺，也需要设计精密而科学的模具才能满足生产实际的需要，同时应选择合理的材料并进行型腔的化学热处理，方可确保模具的使用寿命和尺寸精度的稳定。

3. 十字轴的热处理工艺

目前国内汽车制造厂采用 20CrMnTi 或 20MnVB 钢渗碳处理制作的十字轴，其使用寿命不高，现开始改用低淬透性钢 60Ti 进行中频感应淬火处理，该钢制作的十字轴的中频感应淬火工艺规范为：频率 2500Hz，功率 18 ~ 25kW，电压比 12: 2，电压 350 ~ 450V，电流 160 ~ 165A，加热时间 5.5 ~ 6.5s，冷却用喷淋水压 0.3 ~ 0.4MPa，水温 25℃，自回火温度 160 ~ 200℃。表 4-34 和表 4-35 为两类不同材料经过不同的热处理后组织和性能的对比，从两表中可以看出 60Ti 中频感应淬火后的性能明显优于 20MnVB、20CrMnTi 渗碳钢。

表 4-34 不同材料和工艺处理后十字轴的组织和硬度

材 质	热处理工艺	轴颈根部圆角处		颈 部		心 部	
		金相	硬度 HRC	金相	硬度 HRC	金相	硬度 HRC
20MnVB 20CrMnTi	渗碳淬火	6 级 马氏体 + 4 级 残留奥氏体	60 ~ 62	6 级 马氏体 + 4 级 残留奥氏体	60 ~ 61	低碳马氏体	41 ~ 42
60Ti	中频感应淬火	6 级 马氏体	54 ~ 55	5 ~ 6 级 马氏体	64 ~ 65	托氏体 + 块状马氏体	33 ~ 35

表 4-35 不同材料和工艺处理后十字轴的性能对比

材 质	热处理工艺	切削性能	磨削性能	弯曲疲劳寿命/10 ⁶ 周次	扭转疲劳寿命/10 ⁴ 次	静扭强度 / (N/m ²)
20MnVB 20CrMnTi	渗碳淬火	良好	良好	0.23 ~ 0.62	8.9	9721.6
60Ti	中频感应淬火			>5	60.4	11319

4.3.2 汽车传动轴（或中间轴）的热处理

东风 EQ140 型汽车传动轴总成分解图如图 4-12 所示。传动轴的作用是将变速器转矩传递到驱动桥上，一般分为管式和实心两种。通常传动轴采用空心钢管，具有用料少和质量轻的特点，因此得到了广泛的应用。其右端焊有万向节叉，用来装十字轴轴承，

而左端焊接一段实心花键轴，伸缩套呈空心管状，内有花键，左端部焊有万向节叉，安装万向节的十字轴轴承。花键轴和万向节叉采用中碳钢制造，经热处理后分别焊在传动轴的两端。在万向节传动装置中，传动轴是主要的传力部件，空心轴的壁厚为 1.5 ~ 3.0mm，通常由钢板卷焊而成，只有载货汽车才会采用无缝钢管制造。

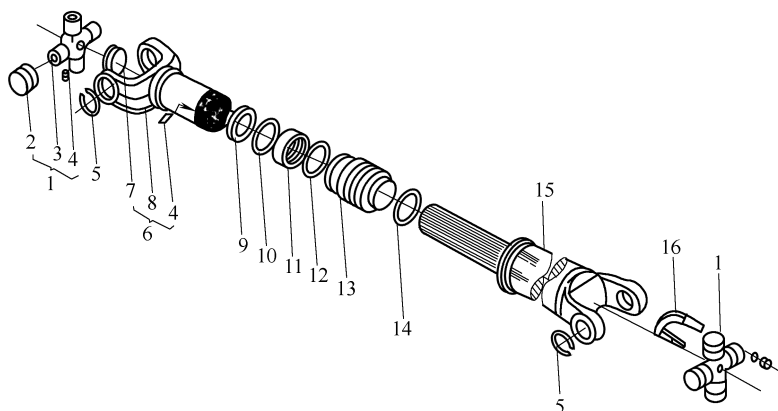


图 4-12 东风 EQ140 型汽车传动轴总成分解图

- 1—十字带滚针轴承总成 2—十字轴滚针轴承总成 3—十字轴 4—直通滑脂嘴 5—孔用弹簧挡圈
6—传动轴套管叉总成 7—传动轴套管叉塞片 8—传动轴套管叉 9—套管叉油封 10—油封垫片
11—油封盖 12—传动轴花键护套大卡环 13—传动轴花键护套 14—传动轴花键护套小卡环
15—传动轴 16—万向节 U 形螺栓

汽车传动轴的热处理工艺为：整根轴轧制为棒料后进行退火或正火处理（含 Mo、V、Ti 的钢一般退火，840 ~ 860℃ 保温后炉冷，获得铁素体 + 珠光体组织；低合金含量的钢一般正火，840 ~ 860℃ 保温后空冷，获得铁素体 + 珠光体组织），以获得较好的切削加工性能，加工后整体进行调质热处理（一般为 840 ~ 860℃ 保温后油淬，进行 550 ~ 650℃ 的高温回火，获得回火索氏体组织），获得强度、韧性、塑性都较好的综合力学性能（抗扭、抗弯、无脆性断裂），然后对其花键进行精加工，此时的花键硬度较低（约 35 ~ 40HRC）不耐磨，还需要对花键进行二次热处理强化，目前多采用感应热处理，获得隐晶马氏体，花键表面硬度为 58 ~ 62HRC，目的是获得较高的抗磨寿命。

汽车传动轴如图 4-13 所示，采用 40MnB 或 40Cr 钢制造，整体调质处理后，在 $\phi 38\text{mm} \times 95\text{mm}$ 处进行中频感应淬火处理，其淬硬层深度为 1.5 ~ 2.5mm，表面硬度在 48HRC 以上。要求抗扭强度高、弯曲刚度大，能满足高速回转的需要。具体的热处理工艺规范见

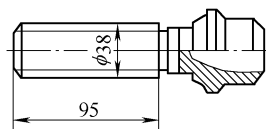


图 4-13 汽车传动轴示意图

表 4-36,汽车传动轴的回火通常采用自回火的方式进行。

表 4-36 汽车传动轴中频感应淬火工艺参数

热处理 工序	设备	加热温 度/℃	加热 时间/s	电压/V	功率 /kW	电压比	冷 却 方 法			
							淬火冷 却介质	温度 /℃	时间 /s	方法
中频感 应淬火	DGF-C-208	870 ± 10	3. 6 ~ 4	745	170	35: 1	质量分数 为 0.2% ~ 0.3%的合成 淬 火 冷 却 介质	< 35	5. 5 ~ 7	喷射

4.4 汽车半轴的热处理

1. 工作条件和技术要求

半轴是汽车后桥承受转矩及一定冲击力的重要结构件，是传递动力的主要部件之一，在工作过程中将主减速器、差速器传来的转矩最后传给驱动车轮，即起到传递发动机扭转力和驱动后桥锥齿轮使车轮前进的作用，花键受力处既有滑动又有冲击，要求其有较高的静扭转强度和扭转疲劳寿命、良好的耐疲劳性能及高的冲击韧度，较深的硬化层等，来满足实心半轴的正常工作需要，因此汽车半轴一般采用中碳钢或中碳合金钢等制造，并进行调质处理。通常载货汽车采用全浮式半轴，易损坏部位在杆部和法兰连接处，或受冲击扭转花键以及花键与杆部连接处，产生疲劳断裂，其使用寿命主要取决于花键齿的抗压和耐磨性能。小客车采用半浮式半轴。图 4-14 所示为半轴易损坏部位示意图，见 a、b、c 三处。

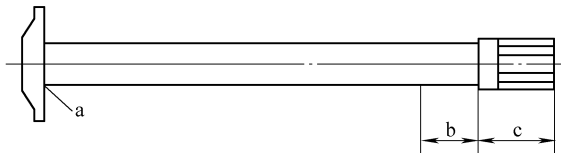


图 4-14 半轴的易损坏部位

2. 材料的选用

根据汽车半轴的工作状态和失效形式，一般选用中碳钢或中碳合金钢制作。小型汽车大多使用 40Cr、40MnB，直径小于 40mm 的半轴采用中碳调质钢如 40、45 钢等，而重型汽车的半轴则采用淬透性较高的合金结构钢，如 40Cr、40CrMn、

40MnB、40CrMo、40CrNiMo、40Mn2、45Mn2、42CrMo、47MnTi、40CrMnMo、40CrNi 等。汽车半轴常用材料和技术要求见表 4-37。

表 4-37 汽车半轴常用材料和技术要求

汽车类型	材料	预备热处理	整体调质		感应淬火		渗碳淬火	
			杆部硬度 HRC	法兰硬度 HBW	层深 /mm	硬度 HRC	层深 /mm	硬度 HRC
轿车和吉普车	40Cr		25 ~ 40 37 ~ 44	≥249	2.5 ~ 5	45 ~ 58		
	40MnB		41 ~ 47	≥247				
	20CrMnTi	正火					1.5 ~ 1.8	58 ~ 63
	42CrMo	正火	28 ~ 32		5 ~ 7	54 ~ 58		
载货汽车	40Cr	正火			3 ~ 6	49 ~ 62		
	12Cr2Ni4A	正火					1.2 ~ 1.6	58 ~ 63
	40MnB	正火 187 ~ 241HBW			4 ~ 7	52 ~ 58		
	40MnB	正火 229 ~ 269HBW			4 ~ 7	52 ~ 63		
重型车	40CrMnMo	退火 ≤255HBW	37 ~ 44	≥247				
	40Cr	正火			7 ~ 10	50 ~ 55		
	40CrNi	退火			8 ~ 10	53 ~ 60		
	47MnTi				6.5 ~ 7	54 ~ 57		

注：只有在特殊情况下，可采用 12Cr2Ni4A 钢制造进行渗碳处理，必须控制残留奥氏体的数量，最后进行淬火处理。

3. 机械加工工艺流程

半轴的热处理工艺不同，则工艺路线也有差别，调质和表面淬火的路线分别如下。

调质处理路线：剪切下料→锻造成形→正火或退火处理→校直→切削加工→调质处理→喷丸处理→检查→精加工→成品。

表面淬火路线：下料→锻造成形→预备热处理→校直→机械加工→表面淬火→校直→精加工→成品。

半轴的正火或退火工序作为调质前的预备热处理，其目的是细化晶粒，降低硬度和改善切削加工性。对于 40Cr、40MnB 等，正火温度为 860 ~ 900℃，时间 45min，空冷，硬度为 187 ~ 241HBW；对于 40CrMnMo 等，退火温度为 860 ~ 880℃，时间 100min，炉冷至 600℃出炉，硬度不高于 255HBW。

4. 半轴的热处理工艺

(1) 半轴的技术要求 半轴的热处理包括调质处理、中频感应热处理以及调

质后再中频感应热处理。半轴的技术要求见表 4-35，通常采用中碳钢或中碳合金钢等制造，个别采用低碳钢渗碳后进行淬火处理。

(2) 半轴的调质工艺 汽车半轴调质处理的目的是获得均匀一致的回火索氏体组织，使半轴心部具有良好的综合力学性能，确保基体的强度和良好的韧性，为最终的表面淬火做好组织上的准备。部分汽车半轴的调质处理工艺规范见表 4-38。

表 4-38 部分汽车半轴的调质处理工艺规范

材料牌号	淬 火			回 火			
	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却方式	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却 方式	硬度 HRC
40Cr	840 ~ 860	50 ~ 55	法 兰 盘 油 冷 10 ~ 15s 后入水 冷却	400 ~ 460	120 ~ 150	水冷	37 ~ 44
40MnB	830 ~ 850	45	油冷	300 ~ 350	150 ~ 180		41 ~ 47
40MnB	850 ~ 870	60	法 兰 盘 油 冷 10 ~ 15s 后入水 冷却	400 ~ 440	160		37 ~ 44
40CrMnMo	830 ~ 850		油冷	470 ~ 490	120		

从表 4-38 可知，中碳合金钢处理后硬度在 37 ~ 47HRC 之间，故其组织为索氏体 + 部分回火托氏体，有较好的疲劳强度、高的冲击韧度等，完全能满足工作需要。

(3) 半轴的感应淬火处理 半轴表面淬火前的预备热处理为正火、退火或调质，以得到合理的基体硬度和强度，为表面淬火做好组织上的准备。半轴法兰与杆部硬化层的连续与否，以及杆部硬化层深度与直径之比，是决定半轴疲劳强度的关键因素，半轴常采用的材料为 40Cr、40MnB、42CrMo、40CrMnMo 等。

对于轻型载货汽车和小轿车，法兰盘式半轴（直径在 50mm 以下）的淬硬层深度按要求确定，如图 4-15 所示。这里以 40Cr 为例简述半轴的表面淬火技术要求：淬火前调质基体硬度为 321 ~ 375HBW，淬火后的硬度达到 45 ~ 58HRC，回火后的硬度均要求为 45 ~ 50HRC，硬化层深为 2.5 ~ 5mm。

半轴感应淬火的主要目的是提高抗扭强度，感应淬火后其扭转疲劳强度比调质态提高十几倍，目前国内外汽车半轴都采用了感应淬火工艺。随着汽车载重量的增加，普遍的做法是增大半轴直径，现在已经增大到 60mm 甚至更大，同时为降低半轴法兰部位过渡圆角的应力水平，应增大圆角尺寸，从 R7mm 增大到 R20mm 甚至更大。材料和热处理科研人员正研究如何增大半轴淬火硬化层的深度，扩大法兰部

位淬火范围，这是提高零件强度的有效措施。试验数据表明，将半轴的淬硬层深度增大 43% 以上，就能够获得理想的扭转疲劳强度等性能指标。

硬化层的深度要求如下：法兰盘根部圆角要淬硬，圆角硬化区的最小直径要比半轴杆部直径大 25%，花键处为花键直径的 10%，杆部为直径的 15%。硬化区可允许有少量的铁素体，在半马氏体处的铁素体量应不大于 20%（体积分数）。根据半轴的工作条件和产生质量问题的主要环节，硬化层必须从法兰盘根部开始直到花键的末端 4~7mm，如法兰盘根部没有硬化或硬度不够，则将大大降低半轴的整体强度。半轴过去多采用调质处理，使用寿命不高。随着科学技术的进步，目前国内外基本都采用感应淬火来代替调质处理，明显提高了半轴的疲劳寿命（从几倍到几十倍），是普通调质处理工艺所无法比拟的，热处理工艺对汽车半轴疲劳寿命的影响见表 4-39。

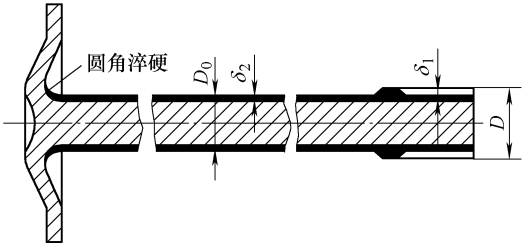


图 4-15 半轴表面淬火的硬化层深度

表 4-39 热处理工艺对汽车半轴疲劳寿命的影响

半轴类型	材质和热处理工艺	表面硬度 HRC	硬化层深度/mm	硬化层深度与直径之比	疲劳断裂循环次数 /10 ⁴ 次
红旗轿车半轴	40Cr，调质处理，局部感应淬火再进行喷丸滚压	44	透	—	42.395
	40Cr，调质处理，局部感应淬火再进行喷丸滚压	46	透	—	289.00
	40Cr，杆部全长感应淬火	52~55	4.6~5.8	0.077~0.127	534.36
解放载货汽车半轴	40MnB，调质处理	37~42	透	—	132.00
	40MnB，毛坯正火，杆部全长淬火	54~58	4.0~6.5	0.08~0.13	590.00
解放越野汽车半轴	40MnB，调质处理	37~42	透	—	9.39
	40MnB，毛坯正火，杆部全长感应淬火	52~54	4~7	0.0952	200.00

从表 4-39 中可知，汽车半轴经调质处理后疲劳断裂循环次数明显低于感应淬火，这同感应淬火热后半轴表面获得的残留压应力有关，资料介绍，感应淬火是提高零件使用寿命的表面强化技术，从某种意义上说它具有操作简单、成本低、易于获得良好强化效果的特点，在汽车制造业中得到越来越多的推广和应用。一般汽车半轴采用圆环感应器进行连续加热，为了提高加热的效率，在有效圈上常装有硅钢片导磁体，槽口斜对法兰圆角，目的是利用槽口效应，将有效圈上的中频电流从圆角驱逐到与圆角对应之处，此处可在 10s 内可得到迅速加热，可以得到非常合理的表面硬化层。所用圆环感应器如图 4-16 所示，半圈式半轴感应器连续淬火技术与圆环感应器相比具有以下优点：能使阶梯轴的小直径轴根处的硬化层平直连续，圆环感应器和半圈感应器淬火结果的对比见表 4-40；解决了花键齿顶硬度偏低的问题；消除了花键过渡软带问题，防止花键过渡区出现“磁场跳跃”。

表 4-40 圆环感应器和半圈感应器淬火结果的对比（以 CA72 红旗轿车半轴为例）

感应器	硬化层深度/mm				金相组织			表面硬度 HRC	
	φ44 处	轴根处	断开距离	φ34 处	φ44 处	轴根处	φ34 处	φ44 处	φ34 处
圆环感应器	3.5 ~ 5.8	0	5	0.3 ~ 4	轴肩 2~3 级 M, 其余 4~5 级 M	P + F	5 ~ 7 级 M	54 ~ 56	52 ~ 56
半圈感应器	4.0 ~ 5.0	2.8	0	2.8	全部 5 级 M	5 ~ 6 级 M	5 ~ 6 级 M	53 ~ 54	51 ~ 53

半轴表面淬火的工艺参数和要求为：加热功率 150 ~ 300kW，频率 2500-3000Hz，半轴采用中频感应淬火，冷却水流速不小于 10m/s，淬火后的工件表面压应力可达 700 ~ 800MPa，经过 250℃ 回火后，降到 400 ~ 500MPa。保证半轴表面存在一定的残留压应力，将有助于使半轴有较高的疲劳强度，可进行自回火，也可在炉内回火，温度控制在 180 ~ 250℃，时间为 90 ~ 120min。为了保证法兰圆角的均匀加热，可在感应器上加导磁体，具体如图 4-17 所示。表面淬火后一般马上进行感应加热回火，随后在井式炉或箱式炉中进一步回火，也可感应淬火后立即在炉中回火。事实证明前一种回火方式有利于防止回火前裂纹的产生。

半轴整体表面淬火技术的出现是感应淬火技术的重大进步，该方法既提高了生产率又节约了能源，由于加热时有效方向与半轴中心线平行，产生垂直于半轴中心线的横向磁场，故轴向尺寸变化不会引起磁力线的转移。矩形感应器纵向加热整体淬火技术与半轴连续淬火相比具有以下特点：生产率高，便于实现机械化和自动



图 4-16 半轴中频连续
淬火用圆环感应器

化；利用邻近效应加热，加热层浅，因此半轴的淬火变形小，只有10%的淬火半轴需要校直；表面得到均匀加热，无淬火裂纹和硬度不均匀现象；淬火消耗的电量低；提高了花键齿顶的硬度。从图4-18中可以看出在有效圈A端的圆弧处镶嵌有硅钢片导磁体，因此在感应加热过程中半轴法兰根部圆角的升温速度较快，该处加热均温时间长，确保了硬化层的深度和有足够的硬化区域。矩形感应器与半轴的间隙为5~8mm，因此升温慢，加热时间长，硬化层厚而均匀，克服了连续淬火时因产生软带而造成的强度低的缺陷，有效避免了花键尾部的断裂。

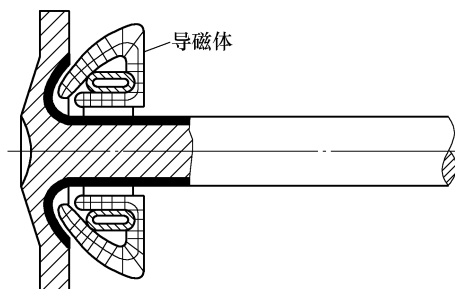


图 4-17 对半轴法兰进行感应加热时采用的导磁体

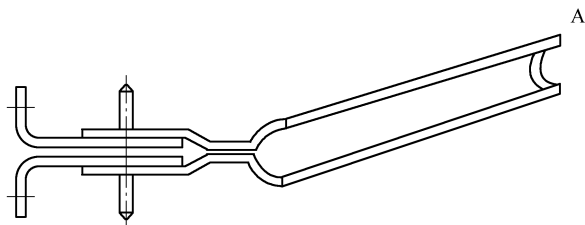


图 4-18 半轴整体一次感应淬火感应器的有效圈示意图

表4-41为40MnB半轴正火、表面淬火后的技术要求，可以看出正火后的硬度是确保感应淬火硬度合格的前提，中频感应淬火实现了半轴高硬度和良好耐磨性的要求，同时也提高了疲劳强度和使用寿命。表4-42为40MnB钢带法兰半轴的感应淬火工艺规范。

表 4-41 40MnB 半轴正火、表面淬火后的技术要求（CA10、EQ1090 汽车半轴）

车 型	技 术 要 求			
	硬 度		硬化层深度/mm	
	正火后 HBW	表面淬火后 HRC	花键	杆部
CA10	187 ~ 241	52 ~ 58	4 ~ 6	5 ~ 7
EQ1090		52 ~ 63	4 ~ 7	4 ~ 7

表 4-42 40MnB 钢带法兰半轴的感应淬火工艺规范

项 目	连 续 淬 火			整 体 淬 火
	法兰圆角	杆部	花键	
发电机空载电压/V	340	400		750
发电机电荷电压/V	335	410	400	730
发电机电荷电流/A	280	285	250	460
发电机有效功率/kW	85	89	85	260
功率因数	1.0	0.99	0.98	0.9
变压器匝数比	11/1	11/1	11/1	12/4
电容量/ μ F	147.35	147.35	149.35	
加热时间/s				58
冷却时间/s				28
水压/Pa	14 710 ~ 34 323			—
淬火冷却介质温度/ $^{\circ}$ C	28 ~ 45			30 ~ 40
淬火冷却介质	质量分数为 0.2% ~ 0.3% 的聚乙烯醇水溶液			热水
感应器移动速度/(mm/s)	3 ~ 12, 常用 3 ~ 6			

采用整体一次感应加热的方法能够克服半轴感应热处理不便于实现机械化和自动化，靠近半轴杆部花键区会产生软带、强度较低以及使用过程中花键尾部断裂的问题。事实证明采取整体一次感应加热的方法，可使法兰圆角部位的加热效果增强，此处加热温度均匀、时间短，故确保了该处的硬化层深度和足够的硬化区域，既提高了疲劳强度又使花键齿部的硬度得到了提高。

需要引起注意的是，中频感应淬火时用水作淬火冷却介质，采用喷射冷却，淬火冷却速度是很快的，图 4-19 所示为 28 $^{\circ}$ C 自来水在不同冷却方式下的冷却能力的比较，从图中可知两者的冷却速度相差很大。在半轴的实际热处理过程中，要采取适宜的冷却方式避免因冷却速度过快而造成半轴的开裂。资料介绍，淬热水温对花键淬火裂纹的影响十分明显，见表 4-43。另外 50 $^{\circ}$ C 的冷却水在 200 ~ 300 $^{\circ}$ C 温度区间内的最大冷却速度小于静水的浸沉冷却，因此可以消除淬火裂纹的产生。可见淬火冷却性能不良和冷却方式不佳（如冷却速度和均

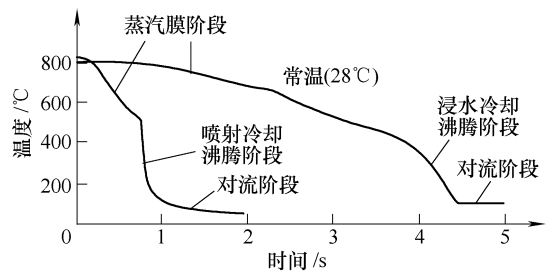


图 4-19 水喷射和浸水冷却的冷却能力的比较（水温 28 $^{\circ}$ C，喷射水量 220mL/s）

匀性) 同样会引起淬火裂纹的产生, 对于硬化层较薄 (2 ~ 3mm) 的花键及一些形状简单的零件, 采用自来水作淬火冷却介质是没有产生淬火裂纹的危险的。

表 4-43 淬火水温对花键淬火裂纹的影响

冷却水温/℃	裂纹的趋势	
	裂纹比例 (%)	裂纹的危害程度
30	80	严重
40	60	严重
50	50	一般
60	10	轻微
68	0	无

- 注: 1. 冷却水泵压力为 0. 15 ~ 0. 2MPa, 感应器喷水压力为 0. 015MPa。
2. 磁粉无损检测检查裂纹。
3. 每种淬火零件检查 20 件。

半轴的表面淬火硬度可通过硬度计、锉刀进行检验, 通常采用洛氏硬度计来判断淬火后的硬度是否符合技术要求。另外为提高零件的力学性能和使用寿命, 对半轴硬度偏差有具体的要求, 其硬度的变化范围也应符合表 4-44 中的规定。所用标准锉刀为双纹扁锉 (规格为 150mm、200mm) 以及圆锉 (规格为 $\phi 4. 3\text{mm} \times 175\text{mm}$, 50 ~ 66 齿/25mm) 等, 标准试块规格为 $\phi 50\text{mm} \times 12\text{mm}$, 作用于锉刀上的力为 45 ~ 53N, 采用标准锉刀十分方便、简单, 但要求检验人员必须有丰富的经验, 否则会造成错判或误判。

表 4-44 感应淬火零件表面硬度的波动范围

零件类型	表面硬度的波动范围 (HRC)			
	单件产品		同一批次产品	
	直径 $\leq 50\text{mm}$	直径 $> 50\text{mm}$	直径 $\leq 50\text{mm}$	直径 $> 50\text{mm}$
重要零件	5	4	6	5
一般零件	6	5	7	6

资料介绍, EQ1090 汽车后桥半轴经感应加热回火后疲劳寿命比炉内回火寿命提高 1 倍, 其原因在于高频加热时最外层首先在感应圈内产生马氏体的分解, 使体积收缩处于相变的超塑性阶段, 待整体回火完成后, 表层形成更大的压应力。因此有利于提高疲劳强度和应力的分布, 而炉内回火时无此压应力出现。感应回火和炉内回火对半轴扭转疲劳寿命的影响见表 4-45, 材料为 40MnB, 正火处理, 试验条件中频感应淬火 (频率 8000Hz), 硬化层深 6 ~ 7mm, 扭转力矩为 2940N · m。

表 4-45 感应回火和炉内回火对半轴扭转疲劳寿命的影响

回火工艺规范	疲劳断裂循环次数/ 10^4 次	损 坏 情 况
空气炉内回火 $180^{\circ}\text{C} \times 60\text{min}$, 52 ~ 54HRC	58 ~ 105	断裂
感应回火 $250^{\circ}\text{C} \times 90\text{min}$, 53 ~ 55HRC	200	未断
感应回火 $300^{\circ}\text{C} \times 120\text{min}$, 50 ~ 52HRC	134 ~ 200	断裂或未断

汽车后半轴用 40Cr 钢制造, 首先经过调质处理后基体硬度控制在 22 ~ 28HRC, 组织为均匀细致的回火索氏体和少量的铁素体。仍然采用中频感应淬火的方法, 获得高的表面硬度, 杆部硬化层硬度为 55 ~ 63HRC、花键部分硬度为 48 ~ 55HRC, 硬化层深度为 3.5 ~ 6.0mm。对半轴的热处理质量进行控制, 使其淬火后的硬度不小于 477HBW, 硬化层深度 (自零件表面至半马氏体区的距离) 必须大于杆部直径的 1/4, 金相组织为回火索氏体和托氏体。

感应加热采用多匝圆柱形感应圈, 以保证半轴加热温度的均匀, 推荐的尺寸为 $\phi 60\text{mm} \times 15 \sim 25\text{mm}$, 花键和杆部的淬火移动速度分别为 0.36m/min 和 0.30m/min。

半轴在热处理过程中产生的淬火裂纹和早期的疲劳断裂, 经分析多数与盘部和杆连接处存在大量的网 (块) 状铁素体有关 (此处硬度低), 一般是由淬火工艺不良、操作不当等造成的, 盘部入水时间过早或离水面太近, 则淬火后的应力过大, 会产生淬火裂纹; 淬火时盘部离水面过远, 盘部和杆连接处会产生强度和硬度低的铁素体组织, 将造成半轴的早期疲劳断裂。为了防止淬火开裂、提高其疲劳寿命, 在对半轴进行整体加热时, 应首先对盘部进行油冷, 出油后进行自回火, 最后进行整体水冷, 如再进行一次中频感应淬火, 其疲劳强度将成倍提高。对于感应淬火零件, 表面淬火缺陷的检验十分重要, 及时检出可避免后续加工的浪费, 通常采用磁粉无损检测法检查淬火裂纹和材料裂纹, 它是利用钢铁零件本身具有铁磁性的性质进行的。磁粉无损检测方法的种类见表 4-46。

表 4-46 磁粉无损检测方法的种类

无损检测方法	具体应用情况
轴通电法	沿轴向通电流, 环绕零件圆周, 建立磁场
触头法	电流通过触头型电极, 使零件磁化
线圈法	磁通沿着零件的长轴方向通过进行磁化的方法
磁轭法	借助永久磁铁, 将磁场导入零件的磁化方法
穿棒法	将棒料导体或电极, 从工件内孔或开口处穿过并进行磁化
感应电流法	将导体放入工件空洞, 施加交变磁场作用, 使工件中三种感应电流 (涡流、邻近电流、圆环电流) 小

5. 半轴的热处理工艺分析与操作要点

1) 为了防止淬火开裂, 采用浸油或浸水的冷却方法, 中频感应淬火采用水、

聚乙烯醇或聚醚溶液作为淬火冷却介质，可有效抑制淬火裂纹的产生。

2) 资料介绍，对于整体淬火时在盘部与万向节处出现开裂的情况，可将盘部首先在油中冷却 8 ~ 10s，取出空冷 15 ~ 20s 后使半轴全部浸入流动的水中，此时杆部的硬度为 46 ~ 48HRC，表面组织为马氏体 + 托氏体，心部为索氏体 + 少量铁素体。

某 40Cr 钢叉车桥半轴装机后短时间内断裂，断口位置在盘部与万向节处，其采用中频感应淬火，技术要求为调质处理硬度 28 ~ 32HRC，花键及杆部至法兰处的表面硬度为 52 ~ 57HRC，淬硬层深为 3 ~ 6mm。

而检测发现调质硬度为 20 ~ 21HRC，淬硬层深度为 2.05 ~ 3.0mm，表面硬度为 52 ~ 56HRC，断口处没有淬硬层，断口处为淬硬层过渡区，此处受到感应淬火时的热影响，造成表面比基体硬度更低，此处强度大大降低，这是造成半轴断裂的主因。将淬硬区延伸到法兰盘内，同时保证调质处理后硬度符合要求，则可避免此缺陷的发生。

3) 半轴的有效硬化层深度对半轴的静态性能极为重要，在淬火操作时应将轴直径的 15% 作为有效硬化层深度来控制，总硬化层深度（包括硬化过渡层）对于轴的疲劳性能有一定的影响，经验表明将轴直径的 25% 作为总硬化层深度是合理的。

4) 半轴应尽可能采用冷校直，因用氧乙炔热点加热后，一旦温度高于相变温度，在急冷后会形成粗大的马氏体，应力很大，半轴在受到反复载荷的作用时，会逐渐扩张出现疲劳断裂。

5) 半轴的热处理质量检验具体参见表 4-47 和表 4-48 执行。

表 4-47 常见合金结构钢半轴调质质量检验

检 验 项 目		检 验 方 法	检 验 要 求
硬度 (HRC)	淬火后	用硬度计测量抽查	≥49
	回火后		38 ~ 50
硬化层深度		测至半马氏体区	大于杆部半径的 1/2
显微组织	硬化层	显微镜观察	回火后为索氏体或带有部分托氏体的索氏体
	心部		从中心到花键底径半径 3/4 范围内允许有铁素体
径向圆跳动		以中心孔定位	按图样及工艺要求

表 4-48 半轴表面淬火质量检验

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求		
		花键部	杆部	法兰圆角
硬化层深度	硬度计	$\delta_1 \approx 10\% D_0$	$\delta_2 \approx 15\% D_0$	圆角淬硬
表面硬度 (HRC)	硬度计	≥49	≥52	—
硬化部位	硬度计或锉检	按图样要求		

(续)

检 验 项 目	检 验 方 法	检 验 要 求		
		花键部	杆部	法兰圆角
显微组织	显微镜观察	硬化层内为回火马氏体，心部为回火索氏体		
畸变	用百分表	按图样要求，一般为：杆部径向圆跳动≤1mm，花键部径向圆跳动≤0.3mm		
无损检测	磁力探伤机	无裂纹		

6. 常见半轴调质和表面淬火的缺陷分析与对策（表 4-49）

表 4-49 常见半轴调质和表面淬火的缺陷分析与对策

热处理方法	缺陷名称	产生原因	对 策
调质处理	花键裂纹	① 淬火温度高 ② 冷却水温低 ③ 表面粗糙度值太大，刀痕或划伤等引起淬火裂纹	① 严格执行工艺参数 ② 按要求加工，确保表面符合图样要求
	法兰盘裂纹	在水中冷却时间过长	严格控制水中冷却时间
	杆部淬火裂纹	① 材料中碳和合金元素如锰含量偏高，淬透性偏高 ② 有连续分布的夹杂物（如氧化物、渗氮物等） ③ 原材料表面严重脱碳	① 检验原材料的淬透性，改变淬火冷却速度 ② 更换为合格的材料 ③ 将脱碳层车削干净或渗碳后重新进行热处理
	淬火后硬度低或硬化层浅	① 加热温度低或时间短 ② 在空气中停留过长 ③ 冷却水温高	重新进行加热淬火处理
	回火硬度低	回火温度高或时间长	进行返修处理
	淬火裂纹	原材料存在缺陷，如成分偏析、内部有夹杂物等，造成表面裂纹	加强对原材料的检验，采用合格的钢材
表面淬火	花键裂纹、电击伤	① 淬火冷却介质冷速快、硬化层深、淬透性高 ② 半轴未退火或正火后即可进行二次淬火 ③ 定位不准，感应器与半轴接触打火放电	① 提高淬火水温，采用热水作为淬火冷却介质，采用聚合物淬火冷却介质，检验原材料的淬透性 ② 严格执行热处理工艺 ③ 固定感应器与半轴之间的间隙，避免碰撞或接触
	软点	① 加热不均或水冷却不均 ② 喷水孔有堵塞	改进工艺或改善冷却条件

(续)

热处理方法	缺陷名称	产生原因	对策
表面淬火	硬化层组织不均匀	感应加热温度低或冷却速度低	严格执行热处理工艺
	淬火软带 (如螺旋状软带)	① 退刀时形成的花键与轴相连的5~8mm不完整花键过渡区局部淬火温度低 ② 感应圈高度太低,以至冷却不足使已淬硬区自回火 ③ 汇流条(排)之间间距大,使面对半轴的部分加热不足 ④ 半轴移动或转动速度不均匀 ⑤ 喷水孔角度不一致 ⑥ 半轴在感应器中的间隙不等(偏心旋转)	① 改用矩形感应器,改善此处加热温度 ② 采用合理的感应器 ③ 调整间隙,确保充分加热 ④ 半轴应进行均匀转动 ⑤ 改进喷水装置,确保方向一致 ⑥ 确保感应器与半轴之间的间隙均匀一致
	变形(或畸变)大、局部熔化	① 淬火应力大,顶针的压力和半轴自重与旋转的离心力的作用 ② 加热时间过长 ③ 存在原始的组织缺陷或感应圈与半轴的间隙未调整好等	① 淬火后进行校直,或在淬火机床上自动校直 ② 严格执行热处理工艺参数 ③ 严格检验原材料的表面质量,调整好半轴与感应器之间的间隙

4.5 汽车稳定杆的热处理

1. 稳定杆的技术要求

汽车在高速行驶中转弯时,在离心力的作用下车身产生横向倾斜及横向角振动,稳定杆的作用为提高汽车行驶的稳定性(尤其是旅行轿车悬架)和提高乘坐的舒适性。工作中它主要承受扭转、挤压和剪切力的作用,某类型汽车悬架稳定杆选用 60Si2MnA 制造,其简图如图 4-20 所示,其技术要求为热处理硬度 44~50HRC,表面无裂纹、斑点、脱碳和脏物等,热处理后进行表面喷丸或喷砂处理。

2. 稳定杆的机械加工工艺流程

稳定杆材料采用弹簧钢,目的是确保零件的刚性和弹性,通

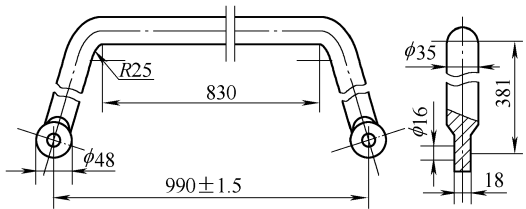


图 4-20 某类型汽车悬架稳定杆简图

常采用 60Si2MnA、50CrV、55SiMnVB、55CrMnA、60CrMnB 等钢，采用高温淬火和一次校直工艺，工艺流程为下料→锻压成形→校直→退火→校直→机械加工→热处理（淬火、回火）→检查→喷丸→涂装。稳定杆属于细长零件，热处理过程中要严格控制变形，改善锻后组织及去应力退火工艺为 850℃ ×1.5h，空冷，采用箱式炉进行，台架支撑，无叠加。

3. 稳定杆的热处理工艺规范

考虑到零件的技术要求，采用的淬火工艺为 840 ~ 860℃ ×40min 油冷，回火工艺为 450 ~ 480℃ ×60min 水冷，为防止零件的弯曲变形，淬火时在箱式炉或步进炉中完成加热，稳定杆在炉底平放，不允许相互挤压，其工艺为 850℃ ×40min 保温结束后，出炉进入机械化淬火夹具（定形）中整体油冷，两耳平面垂直油面同时入油，在油中静止冷却，回火工艺为 460℃ ×60min 水冷。

将两次校直改为出炉后进行一次淬火前校直，用 20 ~ 30s 时间校直后立即装入夹具中冷却。回火与校直在专用夹具中进行，要避免稳定杆排列不规则而影响校直的效果。

资料介绍，热处理后多数悬架稳定杆严重变形超差，见表 4-50。需要退火后返修处理，成本提高，也造成了稳定杆表面质量的降低，疲劳寿命降低，影响了正常生产的进行。

表 4-50 汽车稳定杆热处理后的变形情况

项 目	大于中心距变形超差	小于中心距变形超差	两耳平面度变形超差
变形占比（%）	21	34	5
平均超差（%）	1.7	2.2	3.4

从表 4-50 中可以看出，小于中心距变形超差比例较高，表明组织应力是使稳定杆变形的主要因素，变形是热处理过程中产生的组织应力、热应力及附加应力综合作用的结果，可见控制稳定杆的变形是比较困难的。

针对稳定杆的淬火变形超差问题，采用以下措施才能确保热处理后的产品满足技术要求：合理装夹，采用专用淬火夹具，如图 4-21 所示；改进淬火加热温度，从 850℃ 提高到 880℃，出炉后在 30s 内迅速在平台上校直稳定杆，并装入夹具中，同时确保零件淬火前的温度为 830 ~ 850℃，立即入油淬火，改进后的热处理工艺曲线如图 4-22 所示。采用以上措施后彻底解决了汽车稳定杆变形超差的问题。

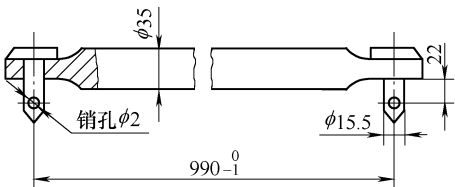


图 4-21 某汽车稳定杆淬火夹具

4. 稳定杆的热处理工艺分析与操作要点

1) 淬火夹具是解决稳定杆变形的关键部件, 用夹具控制稳定杆在冷却过程中的变形, 为此可将加热温度提高到 880℃, 稳定杆在校直和装入夹具的过程中自身温度会下降 20 ~ 30℃, 另外也具有一定的预冷作用, 对减少淬火的组织应力和热应力十分有利, 可从根本上解决稳定杆的变形问题, 大大提高了热处理变形的合格率与生产率。

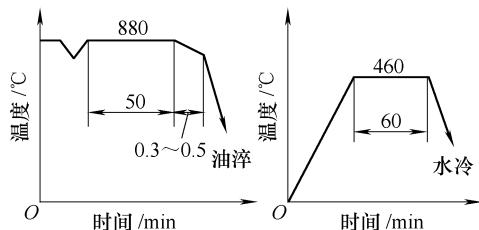


图 4-22 改进后某汽车稳定杆的热处理工艺曲线

2) 需要注意的是, 在淬火过程中要防止出现表面淬不硬、心部淬不透等缺陷的发生, 其心部组织将直接影响热处理质量。要验证热处理工艺参数的正确性, 包括加热温度、加热时间、淬火冷却介质的冷却能力、夹具降温情况等, 严格执行汽车稳定杆热处理工艺, 并进行规范操作与检验, 才能确保热处理质量。

3) 制造工艺不当、热处理工艺不当等将导致稳定杆表面产生柱状晶及晶粒间微裂纹, 内部出现不均匀组织, 从而增大了内应力, 此外成形半径过小、表面质量差、存在氧化皮均会引起应力集中, 在扭转、挤压和剪切力的作用下, 萌生裂纹源并扩展造成稳定杆的早期断裂, 因此要从过程的质量控制抓起, 消除影响质量的不利因素与环节, 满足其工作需要。

参 考 文 献

- [1] 拉符里诺维奇 МФ, 舒斯捷尔尼亚克 М М. 提高汽车零部件的耐磨性 [M]. 谭玉芳, 谭奈林, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] 浙江大学, 上海机械学院, 合肥工业大学. 钢铁材料及其热处理工艺 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1975.
- [3] 机床零件热处理编写组. 机床零件热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 职业技能鉴定教材编审委员会. 热处理工 [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 1996.
- [6] 秦启泰. 应用热处理 [M]. 北京: 金盾出版社, 1997.
- [7] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第 2 卷 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 赵德寅, 王大伦. 汽车零部件金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [9] 王忠诚, 齐宝森, 李扬. 典型零件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] 王忠诚, 孙向东. 汽车零部件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [11] 马鸣图. 先进汽车用钢 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

- [12] 林信智, 等. 淬火感应器的选用设计与制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [13] 侯家驹. 汽车制造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [14] 朱伟成. 汽车零件精密锻造技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [15] 李金桂. 现代表面工程设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [16] 王广生, 等. 金属热处理缺陷分析及案例 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [17] 安宝祥. 汽车制造无损检测技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [18] 方朝云, 阎利民, 等. 叉车桥半轴工艺改进 [J]. 金属加工 (热加工), 2012 (7): 38-39.
- [19] 沈庆通, 梁文林. 现代感应热处理技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [20] 王忠诚, 王东. 热处理常见缺陷分析与对策 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.

第 5 章

行驶系统零部件的热处理



5.1 概述

汽车行驶系统的结构形式因车型和行驶条件的不同而有差异，绝大多数的汽车经常行驶在比较坚实的道路，其行驶系统中直接与路面接触的部分是车轮，因而称为轮式行驶系统，除广泛应用的轮式结构外，还有半履带式、全履带式、车轮-履带式、跨步式等。

汽车轮式行驶系统一般是由车架、车桥、车轮和悬架等组成，如图 5-1 所示。

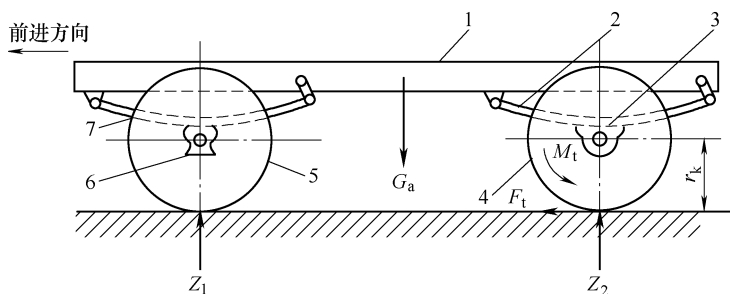


图 5-1 行驶系的组成及部分受力情况

1—车架 2—后悬架 3—驱动桥 4—驱动车轮 5—从动车轮 6—从动桥 7—前悬架

车轮 4 和 5 分别安装在车桥 3 和 6 上，车桥又通过悬架 2 和 7 与车架 1 相连接，车架是整个汽车的基体，构成了汽车的装配基础。

汽车行驶系统支承着汽车的总重 G_a 及其在前后车轮上引起的垂直反力 Z_1 和 Z_2 ，其部分受力情况如图 5-1 所示。

1. 轮式行驶系统的作用

1) 接受由发动机经传动系传来的转矩，并通过驱动轮与路面间的附着作用产

生路面对驱动轮的牵引力,以保证汽车正常行驶。

2) 传递并承受路面作用于车轮上的各向反力及其所形成的力矩。

3) 应尽可能缓和不平路面对车身造成的冲击,并使振动衰减,保证汽车行驶的平顺性。

4) 与汽车转向系统协调配合,实现对汽车行驶方向的正确控制,以保证汽车操纵的稳定性。

2. 轮式行驶系统的组成部件及其作用

(1) 车架 汽车的车架也称为大梁,是整个汽车的基体,一般由两根纵梁和几根横梁组成,经悬架装置、前桥、后桥支承在车轮上。汽车的绝大部分机件和总成(如发动机、传动系统、悬架、转向系统、驾驶室、货厢和有关操纵机构)都是通过车架来固定位置的,并且车架要承受来自车内外的各种载荷,因此应具有足够的强度和刚度以承受汽车的载荷和从车轮传来的冲击。

(2) 车桥 车桥(也称车轴)通过悬架和车架(或承载式车身)相连,两端安装汽车车轮。其功能是传递车架(或承载式车身)与车轮之间各方向的作用力。转向桥能使装在前端的左右车轮偏转一定的角度来实现转向,还能承受垂直载荷和由道路、制动等产生的纵向力和侧向力以及这些力所形成的力矩。

(3) 车轮 车轮是外部装轮胎,中心装车轴并承受负荷的旋转部件,由轮毂、轮辋和轮辐组成。车轮主要分为辐板式和辐条式两类。

车轮的功能是支承汽车及货物总质量;保证车轮和路面的附着性,以提高汽车的牵引性、制动性和通过性;与汽车悬架一同减少汽车行驶中所受到的冲击,并减轻由此而产生的振动,以保证汽车有良好的乘坐舒适性和平顺性。

(4) 悬架 汽车悬架是车架与车桥之间一切传递动力连接装置的统称。汽车悬架弹性地连接车桥与车身,缓和行驶中车辆受到的由路面不平引起的冲击力,保证乘坐舒适和货物完好;迅速减轻由弹性系统引起的振动,传递垂直、纵向、侧向反力及其力矩;并起导向作用,使车轮按一定轨迹相对车身运动。

悬架一般由弹性元件、导向装置、减振器和横向稳定杆组成,其功能如下:

1) 弹性元件用来承受并传递垂直载荷,缓和路面不平、紧急制动、加速和转弯引起的冲击或车身位置的变化。

2) 导向装置用来使车轮按一定的运动轨迹相对车身运动,同时传递力的作用。

3) 减振器用来减轻由弹性系统引起的振动。

4) 横向稳定杆的作用是提高侧倾刚度,使汽车具有不足转向特性,改善汽车的操纵稳定性和行驶平顺性。

3. 轮式行驶系统部件的热处理

悬架与车轮支承整个汽车的质量,其是采用钢铁材料或合金材料制造的,经过

适当的热处理工艺,可获得要求的力学性能,满足零件的服役条件的需要。行驶系统中部分部件的热处理类型主要包括退火、正火、淬火+回火、调质处理、高频感应淬火、中频感应淬火等。本章主要介绍常见零件的工作条件、作用和性能特点及其热处理的工艺方法,同时比较不同热处理方式的区别,分析常出现的热处理缺陷以及注意事项,为零件的正确热处理提供依据。

5.2 转向节、转向节主销和前轴等的热处理

汽车车桥可分为前桥和后桥,又可分为主动桥、转向桥和转向主动桥,其中前桥又称转向桥、工字梁和前轴等,前桥采用碳质量分数为 0.35%~0.45% 的中碳钢模锻,经热处理后而成。转向节使用中碳合金钢,其加工方法与前梁相同。

大多数汽车用销、轴等采用中碳钢冷拔成形后进行表面淬火处理,通常磨削量在 0.05~0.20mm 范围内,冷拔、冷锻表面不再加工,材料表面的原始状态会一直保留在零件的表面。如果有脱碳层存在,则由于螺栓螺纹经过滚压加工,脱碳层将被挤压到螺纹的顶部,因此降低了螺纹部分的强度,会发生脱扣现象。故零件表面不允许有脱碳层,高频感应淬火零件单边脱碳层厚度应 $\leq 1\% D$ (D 为直径),而冷锻用钢脱碳层厚度应 $\leq 1.5\% D$ 。

5.2.1 汽车转向节

1. 工作条件和技术要求

汽车转向节是汽车最重要的保安件之一,它主要承受弯曲载荷的作用,即承受弯曲和扭转应力,其特点是应力在截面上的分布是不均匀的,另外最大应力集中在零件的外缘,越向内部则应力越小。根据上述特性,通常选用调质钢制造转向节,即采用 40Cr、40MnB、40CrMo、40CrMnMo 等中碳合金钢,经过锻造成形。

某汽车转向节简图如图 5-2 所示,其通常由万向节叉、十字轴和轴承等零件组成。

2. 汽车转向节的机械加工工艺流程

汽车转向节的机械加工工艺流程为:剪切或锯切下料→锻造成形→调质处理→机械加工→表面淬火→磨削加工→检验→防锈包装。

3. 汽车转向节的热处理工艺

转向节毛坯调质处理后的技术要求如下:硬度为 241~285HBW,金相组织为回火索氏体。在机械加工后转向节的轴径、圆角和端面同时进行中频感应淬火,

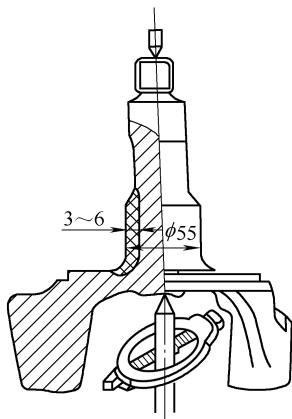


图 5-2 汽车转向节简图

表面硬度为 52 ~ 63HRC，硬化层深度为 3 ~ 5mm，组织为细针状的马氏体。调质处理的转向节加工工序多，有可能因工艺不当、材料不良而成为废品，因此在实际制造过程中，废品多数出现在锻造成形和调质处理的热处理加工过程中，常见的缺陷有锻造过热、硼脆、铜裂、淬裂、折叠、石墨化脆性以及脱碳等。

从汽车转向节的材质和工作条件可知，应首先对其进行调质处理，确保基体的强度满足要求，然后对其进行表面淬火。调质处理是在具有保护气氛的多用炉或盐浴炉内进行的，转向节的调质处理工艺为 850 ~ 870℃ × 70min，淬火冷却介质为质量分数为 0.2% 聚乙烯醇水溶液，580 ~ 620℃ × 3h 回火后水冷。表面淬火则采用专用的感应器进行，采用圆柱形感应器进行中频感应加热，具体工艺参数见表 5-1。

汽车转向节一般使用半圈感应器进行表面处理，其结构如图 5-3 所示。

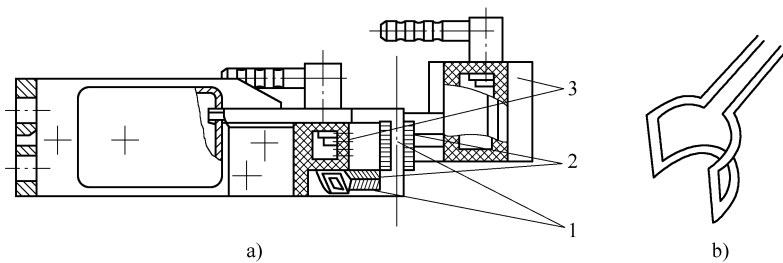


图 5-3 转向节感应器

a) 感应器的总成 b) 有效圈的结构示意图

1—有效圈 2—导磁体 3—喷水器

表 5-1 汽车转向节中频感应加热电参数和淬火工艺规范

淬火方法	中频感应加热电参数							淬火工艺规范					
	变压器匝数比	电容 /μf	频率 /kHz	输出电压 /V	输出电流 /A	输出功率 /kW	功率因数	加热温度 /℃	加热时间 /s	风冷时间 /s	淬火冷却介质	喷水时间 /s	水压 / (N/cm ²)
连续淬火	12/1	107	8	450	85 ~ 110	38 ~ 47	0.8 ~ 0.95	880 ~ 900	22	1.5 ~ 2	质量分数为 0.2% 聚乙烯醇水溶液	18	12 ~ 16
周期淬火		68		53	100 ~ 140	52 ~ 65	0.9 ~ 0.98		23	1		14	

下面将不同热处理工艺对转向节弯曲疲劳寿命的影响列于表 5-2 中，供参考。

表 5-2 不同热处理工艺对汽车转向节弯曲疲劳寿命的影响

材 料	热处理工艺	表面硬度 (HRC)	硬化层深度/mm	弯曲疲劳次数/ 10^4 周次	损坏情况
40MnB 42CrMo 40CrMnMo	调质处理	24 ~ 28		1. 17 ~ 7. 0	在圆角处 断开
	毛坯正火 + 中频感应淬火 + 低温回火	54 ~ 57	3. 5 ~ 6. 0	11. 1 ~ 66. 5	
	毛坯调质 + 中频感应淬火 + 低温回火	54 ~ 57	4. 5 ~ 6. 5	150 ~ 165	未断

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 转向节的技术要求为耐磨性好、疲劳强度高, 采用中碳合金钢制造, 经过调质处理后基体的强度可以得到保证, 表面淬火处理后表面的硬化层深度和硬度则满足了其工作需要。

2) 转向节经毛坯调质 + 中频感应淬火 + 低温回火后, 弯曲疲劳次数能比其他热处理工艺提高几十到上百倍, 其原因为在调质处理的基础上进行中频感应淬火, 相当于对转向节进行了表面强化处理, 表面存在大量的压应力作用。所用感应圈具有半圈式结构, 其特点是转向节轴径、圆角以及端面各部位加热均匀, 硬化层分布合理, 同时可对加热温度和硬化层深度进行调节, 方便进行批量生产。为了提高加热效率, 在轴向导体和半锥环导体上装有Π形硅钢片。转向节的叉子是由碳素钢或合金钢等经过锻造、热处理制成的, 其具有好的刚性和强度。

5.2.2 汽车转向节用球头支承

1. 工作条件和技术要求

图 5-4 所示为某汽车转向节用球头支承, 要求其具有一定的强度和良好的耐磨性, 同时有较高的疲劳强度, 在工作过程中尺寸稳定、可承受一定的冲击作用, 因此要求其进行表面淬火处理, 以具有较高的硬度, 来确保耐磨性, 要求 $SR83\text{mm}$ 球面、 $R14\text{mm}$ 圆弧及 $\phi 74\text{mm}$ 圆柱面均进行表面淬火, 硬化区域连为一体, 如图 5-4 所示。

2. 球头支承机械加工工艺流程

选用的材料为 45 中碳钢, 流程为: 下料→模压锻造成形→完全退火→粗加工 (包括车削、磨削等) →表面淬火→低温回火→校直→磨削加工→低温时效→检查→防锈包装。

3. 球头支承的热处理工艺

材料选用 45 钢, 表面淬火后硬度为 48 ~ 58HRC, 硬化层深度为 3 ~ 6mm。考虑到零件淬火区域的横截面尺寸变化很大, 为满足其硬化层深度的要求, 要使用特殊结构的感应器, 通常采用全淬火面同时加热淬火技术, 所用感应器如图 5-5

所示。

中频感应淬火的工艺参数为：使用 8kHz 的中频电流，输出功率为 140kW，零件的转速为 150r/min，加热时间为 5s，加热完毕全部同时入水冷却。该方法的缺点为操作不太方便。另外资料介绍，采用局部仿形感应器旋转加热淬火技术进行转向节的球头支承处理，效果不错，它克服了全淬火面同时加热淬火时，感应器操作不便和接触的零件表面容易烧伤的缺陷，其特点为两条轴线导线与零件的外形完全相仿，利用邻近效应的原理实现了零件的感应加热，具有结构简单、调整方便、淬火质量稳定和硬化层分布合理等优点。

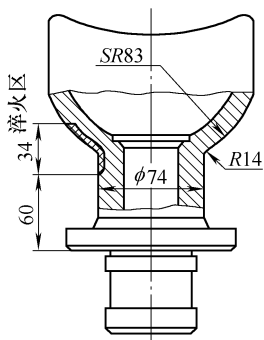


图 5-4 转向节的球头支承图和技术要求

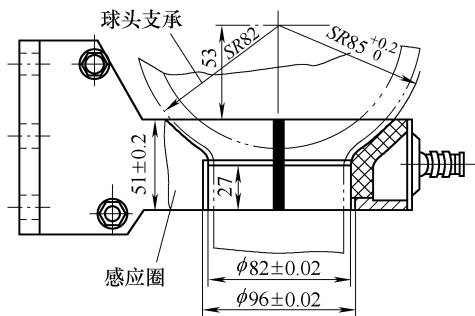


图 5-5 球头支承用同时加热感应器

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 根据球头支承的工作特点，其应使用专用模具锻造成形。球头支承具有比较复杂的结构，因此如何实现局部均匀的热处理是工艺制订过程中的关键问题，各种热处理工艺方法中能实现局部淬火处理的有盐浴淬火和中频感应淬火，比较二者的热处理特点可知，选用感应淬火技术能满足其硬度和硬化层深度的要求。

2) 采用仿形感应器时应将需要表面淬火的全部面积包括在内，因为有效圈的直径越大则中频电流的密度越低，所以在不同截面处感应器与零件的间隙应不同，即直径小的位置间隙大，而直径大的位置间隙小，这样才能确保整个加热表面的温度一致，获得理想的硬度和硬化层深度等。

5.2.3 汽车转向节主销

1. 工作条件和技术要求

汽车转向节的主销为基础件，是一个光滑的圆柱体，起到连接的作用，其热处理质量直接影响到汽车的性能和使用寿命等，其失效的形式为脆性断裂和疲劳断裂。汽车转向节的主销是经过连续冷拔处理的光滑圆柱体，在工作过程中要承受强

烈的冲击载荷和拉伸作用，因此要求主销的表面具有高的硬度和良好的耐磨性，同时其心部要有一定的韧性。

2. 主销机械加工工艺流程

主销的加工比较简单，这里不再赘述。

3. 主销的热处理工艺

主销通常采用 45 钢制造，经冷拔加工而成，有 4 ~ 5mm 的硬化层深度，表面硬度为 48 ~ 58HRC，心部硬度为 25 ~ 30HRC。要满足主销的热处理要求，应在经过冷成形后进行调质处理，这是预备热处理，粗磨后进行中频感应淬火处理，以获得高表面硬度和较深的表面硬化层，使其具备较高的耐磨性，而心部有良好的强度和韧性。

(1) 调质处理 调质处理通常在盐浴炉或可控气氛网带炉内完成，要求基本实现无氧化加热，调质处理的淬火工艺为 $830 \sim 840^{\circ}\text{C} \times 15 \sim 30\text{min}$ ，用质量分数为 5% ~ 10% 的盐水冷却，高温回火工艺为 $500 \sim 550^{\circ}\text{C} \times 90 \sim 120\text{min}$ ，保温结束后空冷。

(2) 中频感应淬火 调质处理后的主销要进行最终热处理，即进行中频感应淬火，中频感应淬火要采用连续式加热淬火处理，感应器与主销的单面间隙应控制在 2 ~ 3mm 之间，喷水冷却的压力应符合设计要求，以获得要求的硬化层深度和硬度。

4. 热处理工艺分析与操作要点

45 钢主销要获得要求的基体强度和硬度，要采用合理的工艺方法和手段，通过调质处理和表面淬火（中频感应淬火）则可满足上述要求。在热处理过程中容易出现缺陷，影响到主销的产品质量，应当引起足够的重视。

1) 主销在中频感应淬火过程中出现的缺陷之一是淬火裂纹。它的特征是与感应器的喷水孔一一对应，表面凸起是由冷却不均匀造成的。因此提高冷却的均匀性，是减少局部变形和开裂的有效措施。通常采取下列方式：增大感应器与主销的间隙，可显著减少淬火裂纹的产生；水的喷射压力要适当降低；使零件旋转，可以消除淬火裂纹。

2) 主销使用中断裂。材料存在严重的冶金缺陷、热加工工艺不当或零件的机械设计存在问题等，都有可能造成主销的失效，对于该问题应进行具体分析与判断。

转向节主销在进行表面淬火后发生断裂，其断口平直。经检验其化学成分、淬火硬度和组织合格，沿中心线剖开后发现主销的心部存在明显的横向裂纹。这是由于存在残留缩孔、心部杂质含量高，恶化了心部的强度和塑性，因此在冷拔过程中产生了横向裂纹，而表面淬火又加剧了脆性，从而导致其断裂。

球头销经过冷成形后进行调质处理，粗磨后进行中频感应淬火处理，如果原材

料本身有裂纹，则裂纹处的电阻会增大、温度会升高，造成该处的硬化层加厚，此时可观察到裂纹与轴平行，时断时续，另外垂直取样观察可见裂纹两侧存在严重的氧化脱碳等。

3) 根据球头销的工作特点可知，与中碳调质钢表面硬化相比，采用低碳钢如 20Cr、20CrMnTi、20Mn2B、20MnTiB 等渗碳处理后淬火的工艺同样可满足其性能需要。

5.2.4 40Cr 球头销

球头销是汽车悬架系统中起铰链作用的部件，用来传递前轮的承载力，在工作过程中，球头销与球头座及粉末冶金球有相对转动，球面受到径向冲击力和顶盖及球座的摩擦力的作用，因此要求其具有下列特性：表面有高硬度；良好的耐磨性；心部具有良好的综合力学性能，如高的韧性等。

球头销的基体硬度为 29 ~ 32HRC，组织为均匀的回火索氏体，故经调质处理即可获得要求的基体强度和韧性。随后应对球头销进行高频感应淬火，以获得硬化的工作表面，满足其工作需要。

设备功率为 60kW、频率为 250kHz，采用折线式 C 形感应器，对零件进行纵向加热，工艺参数见表 5-3，其中栅极电流为 0.6A，回路电压为 9000V，有效功率为 26.1kW。

表 5-3 40Cr 球头销高频感应淬火工艺参数

设备 型号	阳极 电压 /V	阳极 电流 /A	加热 时间 /s	冷却 时间 /s	淬火冷却 介质	杆部 硬度 HRC	球面硬化 深度 /mm
GP60	1 3000	2.9	3.5	8	水（<25℃）	58	1.53

球头类零件感应淬火后可以有效提高疲劳强度，这也是其他热处理工艺所无法比拟的。但由于外形复杂，感应淬火难度比较大，其关键是感应器的设计。如何利用好感应加热原理的几个效应，得到更加均匀的加热温度是感应热处理工作者的不断追求。该零件为汽车悬架系统中的重要零件，设计者在矩形感应器的基础上很好地利用了圆环效应，使零件两边的圆角部位与球面得到均匀地加热淬火，取得了理想的效果，图 5-6 所示为球头淬火形貌。



图 5-6 球头淬火形貌

5.2.5 转向拉杆球头销或上下臂控制球头销

转向拉杆球头销或上下臂控制球头销也是汽车最重要的保安件，要求球头局部

淬硬使其具有高的硬度，以确保获得很高的耐磨性，同时柄部有良好的塑性和韧性，目前采用中碳钢中频感应淬火和渗碳钢局部渗碳淬火两种方法。表面硬度为 50~60HRC，硬化层深度为 1.5~5.0mm，表 5-4 为两种材料经过不同的热处理后的性能比较。从表 5-4 中可知 45 钢中频感应淬火后获得了良好的力学性能，这与球头销经调质处理后整体强度和韧性得到提高有关。

表 5-4 球头销中频感应淬火与渗碳淬火的多次冲击性能的对比

材料及热处理工艺	冲击次数/次					损坏形式
	21.37J	25.3J	27.9J	31.9J	36.4J	
45 钢中频感应淬火	48 619	32 575	20 963	15 360	9365	柄部淬火过渡区断裂
20CrMnTi 钢球部渗碳淬火	14 101	11 841	9 683	—	6135	柄部变形

球头销中频感应淬火采用了全淬火面同时进行感应加热，感应器自动喷水冷却的方法，同时零件可以实现自回火，因此生产率高，图 5-7 所示为常见的感应器形状。另外资料介绍，采用轴线仿形式感应器中频感应淬火技术，可以获得完全仿形分布的硬化层，效果良好。

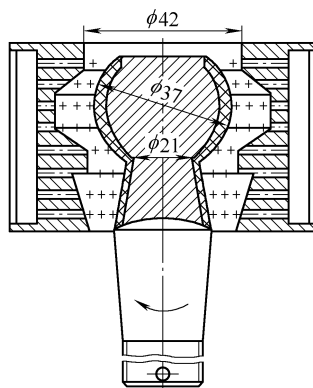


图 5-7 球头销表面中频感应加热感应器形状示意图

5.2.6 拉销

拉销是两个传动齿轮与万向轴之间的支撑销，是汽车和机车运行部分的重要零件，一般采用 45 钢制造，在工作过程中要承受一定的压力和剪切力，因此必须具有高的强度和良好的韧性，即获得稳定的回火索氏体组织，才能使该零件具有良好的综合力学性能，满足其工作需要。其技术要求如下：金相组织为 S_回 + 碳化物，整体硬度为 25~30HRC，此时该钢具有最佳的综合力学性能。

拉销的制造工艺流程为：下料锻造→毛坯完全退火→粗加工→调质处理→无损检测→精加工→成品包装。

由于 45 钢的棒料本身成分不均匀，容易造成偏析和晶粒度的不均匀，直接下料使用不能改变内部的成分，也不能提高其力学性能。因此应将棒料反复镦粗和拔长，这样不仅能改变金属零件的流线，也能打碎碳化物，使内部结构更加均匀，晶粒得到了细化，推荐的始锻温度为 1100~1150℃，终锻温度为 800~850℃。

在锻造过程中要严格执行有关的技术要求，杜绝在终锻温度以下锻造，以免出现锻裂、折叠等致命缺陷。

锻造拉销表面硬度较高,内部应力很大,应进行正火处理,45钢的正火工艺为 $850 \sim 860^{\circ}\text{C}$ 保温 $60 \sim 90\text{min}$ 后出炉空冷(也可风冷或喷雾冷却),硬度 $\leq 229\text{HBW}$ 。

为了满足该零件最终力学性能的要求,需要对其进行调质处理(淬火+高温回火),45钢属于中碳钢,采用的热处理设备为箱式电阻炉、可控气氛炉或盐浴炉等,要减少零件的表面氧化或脱碳倾向,淬火温度为 $850 \sim 870^{\circ}\text{C}$,加热时间根据装炉量而定,例如箱式炉保温时间为 60min 即可,而盐浴炉的保温时间应为箱式炉保温时间的 $1/3 \sim 1/4$,快速淬入质量分数为10%的氯化钠水溶液中,注意应最后冷却销帽部分。

淬火后拉销硬度在 $50 \sim 58\text{HRC}$ 范围内,整体淬硬后马上进行高温回火处理,温度为 $600 \sim 630^{\circ}\text{C}$,保温 $60 \sim 90\text{min}$,将淬火马氏体和少量残留奥氏体转变为稳定的回火索氏体,消除了淬火的热应力、组织应力,防止零件变形和开裂的出现,零件的尺寸稳定,获得了良好的综合性能。

5.2.7 钢板弹簧支承销

汽车钢板弹簧支承销起到将弹簧连接在一起的作用,要求其具有高的耐磨性、足够的强韧性,具有抗剪切和抗拉伸性能,该零件如图5-8所示。技术要求为感应淬火后 100mm 长度上表面硬度为 $58 \sim 63\text{HRC}$,硬化层深度为 $1.0 \sim 2.5\text{mm}$ 。选用45钢制造可满足其工作需要,端头焊有六方螺母,另一端为M25的细牙螺纹结构。另外用U形螺栓把弹簧与轴结合。

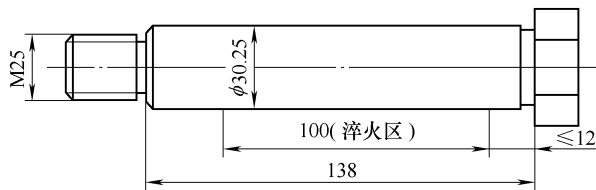


图5-8 钢板弹簧支承销简图

选用的中频感应加热器的结构如图5-9所示。根据支承销直径、长度上的具体硬化要求,感应器有效圈的内径为 35mm ,有效圈的高度为 118mm 。从图5-9中可以看出,球头销在感应加热和冷却时始终垂直于感应器,为保证零件在感应器中的间隙上下均等,在感应器的下端装有限位板19,其上布置有直径 25.5mm 的限位孔。

中频感应淬火的工艺参数为:功率 140kW ,中频频率 8kHz ,加热时间 3.7s ,冷却时间 5s ,冷却水压力 0.3MPa 。

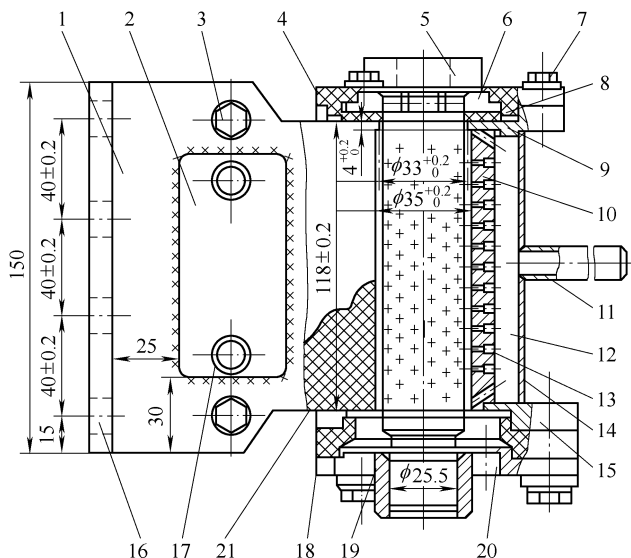


图 5-9 支承销中频同时加热淬火感应器

- 1—接触板 2—冷却水盒 3、7—紧固螺栓 4—上定位环压板 5—支架销 6—上定位环
8—定位环垫板 9—上法兰盒 10—有效圈 11—淬火水管 12—淬火水腔 13—淬火水孔
14—水套 15—下法兰盒 16—感应器圈定孔 17—冷却水管 18—胶木绝缘板
19—下限位板 20—下定位环压板 21—绝缘板

5.2.8 汽车前轴

汽车前轴是十分重要的零件，它具有连接车体和车轮的功能，通常是锻造或铸造而成的，根据其使用性能要求和工作状态等可知，其应具有较高的强度和一定的韧性，一般选用中碳钢或中碳合金钢制造，如 35、40、45 或 30Cr、40Cr、45Cr、42CrMo 等，这些材料经调质处理后的硬度为 229 ~ 255HBW，满足了前轴的性能要求。

5.3 悬架（弹性元件）的热处理

汽车的悬架是连接车轮与车架或车厢的装置，它是由弹性元件（一般为钢板弹簧）、导向装置和减振器组成的，悬架故障多数是由钢板本身与弹簧支架的衬铁成套损坏造成的，即钢板弹簧与衬铁固定处磨损以及装在支架下面的钢板弹簧滑移，端部受到磨粒磨损。

汽车用弹簧大致分为压缩弹簧、板簧和扭杆弹簧三类，它们承受循环载荷的作用，容易发生疲劳损坏，为了提高疲劳寿命，在实际生产过程中采用了表面强化处

理→喷丸处理。砂粒或钢丸以高速无数次喷射到弹簧的表面上,表面产生许多小压坑,使弹簧表面呈细鼓包状,表面硬化也减轻或消除了弹簧表面存在的缺陷(残留盐、氧化皮、脱碳层、缺口、加工刀纹等)的有害作用,因此提高了弹簧的疲劳寿命。

在对弹簧进行喷丸时,应根据其尺寸的大小和技术要求来正确操作,首先应选择合适的弹丸材料和规格,避免采用带有尖锐棱角的弹丸;其次应挑选符合要求的喷丸机,喷射速度要满足需要。

5.3.1 汽车钢板弹簧

1. 工作条件和技术要求

汽车钢板弹簧是一种弹性元件,其作用是承受车厢以及载物(静载荷),可传递垂直载荷,缓和及抑制不平路面所引起的冲击,限制车身和车轮的振动。作为弹性元件它既有缓冲、减振、储能的功能,又起到传递力和导向的作用,在工作过程中,钢板弹簧承受道路不平所引起的冲击载荷以及由此引起的单向循环弯曲应力和振动的作用,同时也要受到泥水和泥沙等的侵蚀。由于其结构简单、使用可靠、维修方便,因而被一般载货汽车广泛采用。

汽车钢板弹簧采用合金钢制造,硬度为380~460HBW,板簧具有优异的强度特性,即高的弹性极限,经过抛丸后处于表面压应力状态,然后进入机械加工阶段。

资料介绍,重型汽车的几率-应力曲线表明,钢板弹簧所受应力为900~1000MPa。汽车钢板弹簧的主要失效形式有腐蚀疲劳断裂、应力腐蚀断裂、脆性断裂、磨损和应力松弛以及永久性塑性变形等,其危害有停车待修、板簧耗损量大、降低行车舒适性等,因此应认真对待,降低出现失效的几率,在弹簧制造和热处理等各个环节确保产品质量合格。钢板弹簧应具有高的弹性极限、良好的淬透度、低的脱碳敏感性、较高的硬度和强度、一定的冲击韧度、良好的疲劳强度以及最大比弹性功,破断部位一般在卷耳与中间固定处。

钢板弹簧一般由多片曲率半径不同、长度不等、宽度一样的钢板等组成,如图5-10所示。

钢板弹簧在载荷作用下变形时,各片之间因相对滑动而产生的摩擦以及两端支承处的摩擦,可以促进车架振动的衰减。但各片间的干摩擦将使车轮所受的冲击在很大程度上传给车架,降低了悬架缓和冲击的能力,并使钢板弹簧各片加速磨损。因此各片之间应涂上较稠的石墨润滑脂,也有的在钢板弹簧片之间夹入塑料垫片。

汽车钢板弹簧在工作状态下要吸收大量的弹性功,又要求本身不发生永久变形,因此其具有高屈强比和尽可能大的弹性比功,为了得到强度高、疲劳极限大的钢板弹簧,板簧用弹簧钢应选用碳质量分数为0.45%~0.65%的合金钢,如

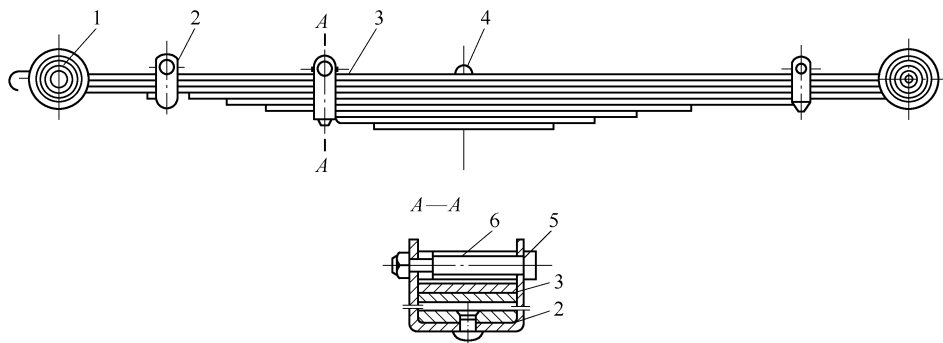


图 5-10 汽车钢板弹簧

1—卷耳 2—钢板夹子 3—钢板 4—中心螺栓 5—螺栓 6—套管

60Si2Mn 材料, 其中各元素的质量分数为: 碳 0.54% ~ 0.64%, 硅 0.50% ~ 2.00%, 锰 0.60% ~ 0.90%, 铬和镍小于 0.35%。硅在钢中形不成碳化物而是固溶铁素体中, 产生固溶强化作用, 显著提高钢的硬度和整体强度, 它的存在提高了钢的弹性极限、屈服强度和屈强比以及疲劳强度和疲强比, 回火后的疲强比为 0.8 ~ 0.9。因此 60Si2MnA 材料适宜制作汽车钢板弹簧。材料的选择应从钢材的工艺性能和力学性能方面进行考虑, 前者影响零件制造的难易程度, 后者必须满足零件的设计和使用要求, 且能提高零件的使用寿命。

2. 汽车钢板弹簧的机械加工程序

一般汽车弹簧钢板的加工程序为: 剪切下料→机械加工 (钻孔、切角等)→校直→卷耳→淬火→中温回火→喷丸→质量检查。

考虑到弹簧的工作条件, 为确保获得理想的技术指标, 对原材料的要求比较严格, 一般供货状态为热轧状态。通常技术要求为钢材的化学成分、表面脱碳层的深度及游离态的石墨等夹杂物符合规定, 表面不允许有麻点、裂纹、锈蚀、折叠、斑疤、气泡及压入的氧化皮和棱边碎裂等致命缺陷, 并进行表面抛丸或抛光处理, 从而大大提高其疲劳寿命。

3. 汽车钢板弹簧的热处理工艺规范

汽车钢板弹簧选用的材料为 60Si2MnA, 其热处理工艺流程为: 预热→加热→冷却→中温回火→喷丸, 要求硬度为 42 ~ 45HRC, 板簧淬火后必须及时进行回火处理, 回火温度一般为 440 ~ 520℃, 金相组织为回火托氏体 + 碳化物。

(1) 加热工艺参数 为实现汽车弹簧钢板的热处理, 应将其加热到奥氏体化温度, 最佳的加热温度为 860 ~ 880℃, 奥氏体化温度的高低对钢板的淬火马氏体 (金相组织) 有重要的影响, 低于 860℃ 淬火后获得了片状马氏体, 高于 880℃ 时为板条马氏体, 温度越高板条马氏体的数量越多, 且尺寸逐渐长大, 同时残留奥氏体的数量增多, 低于 900℃ 时残留奥氏体呈块状分布在板条马氏体之间, 当达到

920℃时则明显形成条状残留奥氏体，并沿板条马氏体分布。

采用的热处理加热设备有燃油炉、可控气氛网带炉和燃煤反射炉，从生产的流程来分单板弹簧可在连续式加热炉（液压步进式）、周期性作业炉内完成加热过程，连续式加热炉具有炉温均匀、成分稳定、热效率高等特点，采用运输带将钢板从一端送入炉内，从另一端出炉冷却，资料介绍，钢板在加热炉内的保温时间不得低于表 5-5 中的规定。

表 5-5 汽车板簧厚度与加热保温时间的关系

板簧厚度/mm	6.5	8	8.5 ~ 10	12
保温时间/min	2	3	4	5

(2) 冷却工艺要求 弹簧钢板在加热炉内的保温结束后，采用链板式输送链将弹簧钢板在淬火机上自动夹紧成形，或经机械手将加热的钢板移动到液压自动弯曲淬火机内喷油冷却，或入油左右摇摆进行冷却，自动卸片，再经输送带传递出淬火油池。淬火油池内的淬火冷却介质为 5 号机械油，油温为 20 ~ 80℃，淬火后的马氏体级别在 5 级左右，淬火后基体硬度≥63HRC。连续式加热炉处理的弹簧钢板的质量稳定，表面基本无氧化和脱碳，是目前国内外热处理企业普遍应用的热处理设备。

(3) 回火工艺参数 汽车钢板弹簧的回火应在 460 ~ 540℃ 的温度下进行，以获得回火托氏体组织。需要注意此时碳化物未明显长大，具有应力分布特征，基体 α 相仅发生回复过程，保持马氏体针状态和一定的强化效果，使回火托氏体有较高的弹性极限。回火后水冷可以防止第二类回火脆性的出现，使钢板表面产生了残留压应力，提高了疲劳强度，硬度为 42 ~ 45HRC。推荐的在油炉中的保温时间见表 5-6。

表 5-6 汽车板簧厚度与回火保温时间的关系

板簧厚度/mm	< 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25
保温时间/min	25 ~ 30	30 ~ 35	40 ~ 45	45 ~ 50

回火温度同样会影响汽车钢板弹簧的力学性能，试验表明在 910℃ 加热淬火，分别在 420℃、460℃ 和 500℃ 回火处理，回火后的组织回火托氏体具有不同的形态。提高回火温度到一定程度后，获得的板条马氏体的断裂韧度随温度的升高而急剧下降。其原因在于板条马氏体断裂韧度很高，随着回火过程的进行，逐渐有针状碳化物析出和长大，从而使钢的断裂韧度降低。只有碳化物团聚才能使钢的断裂韧度再次提高。而片状马氏体由于其本身的断裂韧度较低，必须提高淬火温度，使碳化物析出并聚集，故 870℃ 加热淬火和 520℃ 以上回火对韧性是有利的。

(4) 注意事项 由于汽车钢板弹簧为长条状结构, 在炉内为连续加热, 自炉内传出到进入液压淬火机需要一定的时间, 因此其工艺加热温度为 $940 \sim 950^{\circ}\text{C}$, 保温 $12 \sim 18\text{min}$, 在液压淬火机内进行油冷前, 板簧的温度为 $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$, 符合加热温度的要求, 回火温度为 $500 \sim 540^{\circ}\text{C}$, 保温 $60 \sim 90\text{min}$ 后水冷。

合金弹簧钢的临界冷却速度较低, 为防止淬火开裂, 在油中冷却是可行的, 可获得细致的马氏体组织, 但应防止淬火油中混进水, 否则将会在板簧表面生成一层导热不良的蒸汽膜, 使冷却能力下降, 并导致淬透性不良。

60Si2MnA 汽车钢板弹簧也可采用硝盐冷却, 具体工艺为 $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$ 加热, 淬入硝盐水溶液中 (淬火冷却介质中各成分的质量分数为 $31\% \text{NaNO}_3$ 、 $21\% \text{NaNO}_2$ 、 $48\% \text{H}_2\text{O}$, 密度为 $1.44 \sim 1.46\text{g}/\text{cm}^3$, 使用温度在 20°C 以上), $450 \sim 470^{\circ}\text{C}$ 回火 1.5h 后出炉水冷, 硬度为 $43 \sim 46\text{HRC}$ 。此种方法具有无污染、介质不易老化、工件变形小和不易开裂的特点, 同时改善了作业环境, 适合于批量生产。

4. 汽车钢板弹簧热处理工艺分析与操作要点

1) 上述成熟工艺已经普遍使用, 目前少数弹簧厂采用了高温快速回火工艺, 即在 $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 送入炉内, 加热 $5 \sim 15\text{min}$, 此时钢板表面在 600°C 左右。这种方法缩短了回火时间, 马氏体分解速度加快, 消除了淬火应力, 马氏体分解析出的碳化物来不及长大, 故弥散度大, 性能稳定。需要注意的是汽车钢板弹簧失效的原因除了设计、安装和使用方面的以外, 更为重要的是热处理质量和表面质量, 前者是指硬度、组织和内应力, 后者取决于表面脱碳层的深度、喷丸工艺, 与热处理密切相关, 因此如何实现钢板的无氧化加热是热处理工艺人员首先考虑的问题。

2) 在淬火过程中, 加热温度、保温时间和冷却速度是十分重要的工艺参数, 若温度过高, 则奥氏体晶粒粗大, 氧化脱碳严重, 将会降低其强度和疲劳极限; 而温度过低, 则会造成组织转变的不均匀, 出现未溶解的铁素体, 同样会降低其强度和使用寿命, 因此要严格控制淬火温度。

汽车弹簧钢板所受负荷属于小能量多次冲击和疲劳载荷, 提高淬火温度获得板条马氏体即可提高其抗拉强度和疲劳寿命, 淬火温度为 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 时获得的抗拉强度、冲击韧度以及断裂韧度等最佳。但为确保抗弯强度和冲击韧度, 淬火温度应在 880°C 以下, 事实证明淬火温度为 $860 \sim 880^{\circ}\text{C}$ 是最佳的。另外根据服役条件的具体要求, 材料应满足强韧性的要求, 因此应采用较低的回火温度, 回火温度以 460°C 为佳。钢板在 870°C 左右淬火成形 + 回火 + 喷丸 (或抛丸) 后, 疲劳寿命明显提高。

3) 目前国内外对汽车板簧进行热处理方法, 除了常规的整体淬火外, 已经发展了整体感应加热强化工艺, 使表层具有 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 的马氏体组织, 表面存在较大的残留压应力, 可提高承载能力, 延长使用寿命。另外还采用了形变热处理工

艺，在钢板加热后，在辊压机上进行热变形压轧，利用余热进行淬火处理，使金属细化、马氏体的长度和宽度减小，加上采用了保护气体，减少了钢板的表面脱碳，提高了表面质量，从而提高了疲劳寿命。

4) 为减少板簧表面的脱碳层，推荐选用盐浴炉或可控气氛炉，也可进行高频感应淬火，从而提高弹簧的弯曲疲劳强度和使用寿命。氧化会降低表面质量和疲劳强度，脱碳则强烈降低疲劳强度，导致出现早期断裂。事实上钢板弹簧在热处理过程中如果出现表面脱碳将显著降低弹簧的抗疲劳性能，这是因为一方面脱碳层的存在降低了表面硬度，另一方面有软点或铁素体存在，成为疲劳裂纹源。

对脱碳层深度不同的钢板弹簧进行弯曲疲劳试验，结果表明，钢板表面脱碳层越深，则疲劳强度越低（当脱碳层深 0.141mm 时，疲劳极限只有 350MPa），而无脱碳层则明显提高（570MPa），具体见表 5-7。脱碳层的存在对弹簧的使用寿命有重要的影响，材料热处理前后的表面状态不允许改变。

表 5-7 脱碳层深度对钢板弹簧疲劳寿命的影响

试验编号	交变负荷 /MPa	表面脱碳层 深度/mm	调质硬度 (HRC)	疲劳极限 /MPa	交变最大弯 曲应力/MPa	断裂时交变应 力变化次数/次
1	0 ~ 650	无脱碳层	45 ~ 48	570	650	315 000
2		0.089	43 ~ 44	350		245 000
3		0.141	44 ~ 45	350		131 000
4		0.147	43 ~ 44	200		129 000
5		0.203	42	170		127 680

资料介绍，通过分析 55SiMnVB 脱碳对疲劳极限的影响可见，脱碳与未脱碳材料的疲劳强度相差 59%，由此可知，严重脱碳的钢板弹簧（图 5-11）的疲劳寿命的显著降低。

5) 为了提高钢板弹簧的使用寿命，可进行形变热处理，利用马氏体相变强化和形变强化提高了抗拉强度和韧性。

6) 为了提高弹簧的疲劳强度，可进行应力抛丸和弹簧棱边喷丸。喷丸后钢板表面发生塑性变形，抵消了工作过程中承受的弯曲压应力，抗拉强度提高 25% 以上。通常抛丸是对板簧的凹面进行喷射，抛丸或喷丸可除掉弹簧钢板上粘附的残盐或油垢及

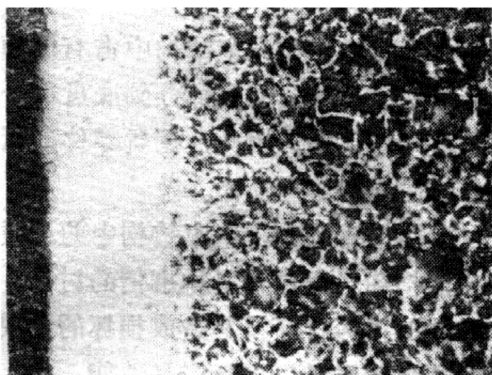


图 5-11 严重脱碳的钢板弹簧 (×100)

氧化皮等,使表面清洁呈银灰色,砂粒直径为 $0.5 \sim 1\text{mm}$,压力为 $0.3 \sim 0.66\text{MPa}$,喷射角度为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。喷丸强化处理可明显提高疲劳寿命、耐蚀性和耐热性,采取强压(弯、扭、拉)也是改善弹簧拉应力松弛的有效方法。该方法主要用于承受循环载荷、容易发生疲劳损坏的各种压缩弹簧、板簧和扭杆弹簧等,在其成形及热处理后进行。研究发现喷丸强化处理减轻或消除了弹簧表面缺陷(如小裂纹、凹凸、缺口以及表面脱碳等)的有害作用,表层产生循环的塑性变形、加工硬化和有利的残留压应力,可有效提高疲劳寿命。

喷丸机由弹丸加速装置(如离心式及气喷式弹丸循环装置)弹丸分离装置、弹丸补充装置和操纵被加工零件的运动装置等组成,目前在国内有滚筒式、履带式、吊链式、轨道通过式、转台式、台车式、钢板预处理式等抛丸机或喷丸机,另外还出现了吊挂式喷丸机,可满足不同的工作需要。

汽车板簧的断裂源萌生于其侧面(厚度弯曲表面),喷丸对钢板弹簧的影响很大。板簧损坏的主要原因是板簧之间接触面上的微动引起微粒的磨损(垫板边缘或其他弹簧板的过渡区),为了抑制在微动磨损过程中发展的摩擦表面上的粘着、疲劳氧化磨损、疲劳腐蚀磨损和磨粒磨损,可以采取以下两种措施:消除(或减小)相对位移和缩短损坏过程,即用正常的磨损过程(最低磨损速度)来代替现有的急剧磨损方式;将相对位移运动传给中间介质,消除微动,通常在低弹性模量的金属基体上采用阻尼材料、聚合物、涂料等来实现,这种方法在国外得到了极为广泛的应用。资料介绍喷丸对55SiMnVB平板试样及弹簧使用寿命的影响为:喷丸后的平板试样比未喷丸的疲劳强度提高90%,货车用钢板弹簧平均寿命提高6倍以上。60Si2MnA弹簧(尺寸为 $7\text{mm} \times 65\text{mm} \times 560\text{mm}$)经 920°C 淬火+ 480°C 回火后,硬度为 $42 \sim 47\text{HRC}$,然后进行喷丸处理,用 $0.8 \sim 1.2\text{mm}$ 的钢丸,新旧钢丸各占50%,采用离心式喷丸机,叶片速度为 2500r/min ,喷射速度为 70m/min ,叶轮中心至工件表面的距离为 0.5m ,角度为 45° ,喷射时间为 24s ,放入Al menC片,强化喷丸强度,其结果见表5-8。

表 5-8 喷丸强度对 60Si2MnA 汽车钢板弹簧疲劳寿命的影响

序 号	喷丸强化情况	疲劳寿命(10片的平均值)/次
1	未喷丸	37 500
2	0.16C	116 250
3	0.18C	193 500
4	0.20C	172 500

注: C 为弧高;疲劳试验频率为 $15\,000\text{次/h}$ 。

从表中可知强度为 $0.18C$ 时,疲劳寿命最高。事实上除了对钢板正面喷丸外,棱边喷丸对60Si2Mn钢板弹簧疲劳寿命的影响也是较大的,见表5-9,试验压力为 1029MPa 。

表 5-9 钢板棱边喷丸对 60Si2MnA 钢板弹簧疲劳寿命的影响

序号	热处理工艺	硬度 HRC	脱碳层 深度/mm	喷丸方法	断裂周次/次	疲劳寿命 对比（%）
1	920℃×5min，油冷 540℃×50min 回火	39~40	0.136	一般喷丸	107 800	100
		40		一般喷丸+棱边喷丸	161 280	150
		41~42			160 160	149
2	920℃×5min，油冷 510℃×24h 回火	44~45	0.077	一般喷丸	75 880	100
		43~44		一般喷丸	98 440	100
		43		一般喷丸+棱边喷丸	183 960	221
		44~45			95 200	114
		44~45			144 480	174
		44~45			852 100	102
		40~42			201 320	243
		41			129 360	156

5. 汽车钢板弹簧的热处理质量检验

关于钢板弹簧的工作过程，前面已经作了部分介绍，它的受力状况比较复杂，通常受到弯曲应力、压应力和剪切应力的共同作用，因此整个截面必须淬透，回火后获得回火托氏体组织，具有高的屈强比和优良的疲劳强度等，能满足弹簧的工作要求。如果淬火后出现铁素体、珠光体或贝氏体组织，则将使弹簧回火后的力学性能严重恶化。调质处理后的显微组织一般按回火后回火托氏体和铁素体的形态、数量以及分布分为 8 级，见表 5-10，1~4 级为合格组织。

表 5-10 汽车钢板弹簧热处理后金相组织的分级

级别	回火后的金相显微组织
1	均匀细致的回火托氏体
2	中等细致的回火托氏体
3	呈带状分布的回火托氏体
4	较粗的回火托氏体
5	回火托氏体、少量贝氏体和少量条状铁素体
6	回火托氏体和条网状铁素体
7	回火托氏体和带状分布的未熔铁素体
8	回火托氏体、大量网状铁素体和少量片状珠光体

试验表明调质处理后的钢板弹簧如果有贝氏体和铁素体，则抗拉强度和冲击韧度将明显降低，对弯曲疲劳寿命的影响尤为显著，见表 5-11。

表 5-11 60Si2MnA 钢板金相组织与力学性能的关系

序 号	显 微 组 织	力 学 性 能	
		抗拉强度/MPa	断面收缩率 (%)
1	回火托氏体 + 大量未熔铁素体	990	36
2	回火托氏体 + 少量未熔铁素体	1590	29
3	回火托氏体	1610	30.5
4	粗大回火托氏体	1510	28.5

从表中可知，严格控制钢板弹簧热处理后的金相组织，选择合理的热处理加热、冷却工艺参数是保证钢板弹簧质量的前提，也是提高其使用寿命的有效措施。

钢板弹簧抛丸校直后，进行磁粉无损检测和石墨化检查。抛丸或喷丸可使表面 0.25mm 内存在压应力层，提高了疲劳强度，疲劳寿命可达到 50 万次以上。

6. 汽车钢板弹簧的常见热处理缺陷分析与对策

从众多失效板簧的断口分析可知，钢板弹簧的棱边是疲劳断裂源，为应力最集中的部位，是热轧和热处理过程中出现缺陷的位置，检查发现棱边的脱碳程度比其他位置严重，脱碳层比其他位置深。一般弹簧出现的质量问题是表面脱碳、脆性的马氏体组织、组织粗大、非马氏体组织过多、回火不足等，因此在实际的热处理过程中，应严格执行工艺要求，并注重减少导致上述缺陷的根源，从而使弹簧的疲劳强度和使用寿命会得到大幅度的提高。表 5-12 为汽车钢板弹簧的常见热处理缺陷分析与对策。

表 5-12 汽车钢板弹簧的常见热处理缺陷分析与对策

缺 陷 名 称	产 生 原 因	预 防 措 施
硬度不足、弹性低	① 加热温度高或低 ② 冷却不足或不均匀 ③ 回火工艺不当 ④ 加热时奥氏体晶粒粗大 ⑤ 淬火加热时表面脱碳	① 严格执行工艺规定 ② 加强冷却系统的循环，确保冷却均匀 ③ 合理制订工艺参数 ④ 严格控制温度和保温时间 ⑤ 盐浴加热时充分脱氧，或采用保护气氛加热 ⑥ 提高回火或时效的控温精度和炉温的均匀性
组织过热或过烧	① 加热温度过高 ② 保温时间过长	① 及时校温，加强金相检查 ② 选择合理的时间

(续)

缺陷名称	产生原因	预防措施
表面氧化、脱碳或元素贫化	① 原材料本身脱碳 ② 淬火加热时盐浴脱氧不充分 ③ 真空炉加热时炉内真空度过高或过低，漏气率大 ④ 炉温过高 ⑤ 加热保温时间长 ⑥ 可控气氛热处理炉密封性差	① 严格检查原材料 ② 充分脱氧，氧化钡的质量分数低于 0.5% ③ 选择合理的真空度范围，检查炉体的密封情况，确定加热温度和保温时间 ④ 控制炉温在工艺范围内 ⑤ 缩短加热时间 ⑥ 检查可控气氛热处理炉的密封性，采取措施确保炉内无氧化性气氛
变形不合格	① 加热时放置不当 ② 冷却不均匀 ③ 回火压紧力不足 ④ 残留奥氏体过多	① 钢板之间无叠压 ② 加强油循环的速度，不允许油温骤然升高 ③ 检查回火胎具是否符合技术要求，预紧力要合理 ④ 多次回火或延长回火时间 ⑤ 采用冰冷处理，减少残留奥氏体的数量
脆性	① 冷却慢产生回火脆性 ② 有过热现象	① 回火加热后快速冷却 ② 严格控制加热温度和保温时间，过热弹簧可在正火后重新热处理
淬火开裂	① 淬火加热速度快，没有预热或预热不充分 ② 冷却速度快，淬火冷却介质选择不当 ③ 加热温度过高或保温时间长	① 充分预热或分段加热 ② 选择符合要求的淬火冷却介质，确保冷却效果 ③ 严格执行工艺规定的加热温度和保温时间
表面腐蚀	① 盐浴脱氧不良或带有硝酸盐 ② 没有及时清理表面的残盐 ③ 零件表面不清洁	① 对盐浴炉充分脱氧 ② 用煮沸法将表面的残盐清理干净，清洗干净后烘干 ③ 采用喷丸或喷砂清除表面的污物、油物或其他影响表面清洁的缺陷

5.3.2 其他悬架弹簧

轿车用悬架弹簧有压缩弹簧、组合式弹簧和扭杆弹簧三种，一般悬架弹簧分为圆柱形和腰鼓形，在周期性扭转、弯曲等交变应力的作用下，经常承受振动和冲击，同时也要受到水雾和泥沙的侵蚀等，因此工作条件恶劣，易于发生疲劳断裂失效。

根据上述要求选用 50CrVA、60Si2CrVA 等高强度合金钢制造。圆柱形压缩弹簧采用 Si-Cr 淬火钢丝，工艺流程为卷制→去应力退火→磨两端面→喷丸→冷成形

强压处理→无损检测→负荷分选→工作面喷涂→包装入库。而采用热轧或退火的盘条钢丝时工艺流程则为材料校直→冷卷或热卷→磨两端面→调整（再加热淬火或分级淬火）→回火→磨两端面→无损检测→喷丸→冷或热强压→负荷分选→工作面喷涂→包装入库。

腰鼓形弹簧可减轻自身质量，提高行车的安全性及舒适性，同时降低了能耗。悬架弹簧的主要失效形式为脆断，这多数是由热处理时弹簧表面严重脱碳和回火不足造成的，因此在实际的热处理过程中，要加强炉内气氛的控制，确保内部为还原性气氛，如使用盐浴炉，则盐浴中杂质 BaO 的质量分数小于 0.5%，实行每 8h 脱氧一次，在夏季则 4h 一次等措施可基本保证弹簧的表面成原始状态。回火时间应依据弹簧的直径大小、装炉量的多少和炉膛的大小等因素综合考虑，原则上油炉或硝盐炉内的回火时间可比空气回火炉内的时间适当短一些，但均不能少于 60min（保温时间）。同时配合金相检查，可确定最佳的回火工艺参数。

悬架弹簧的热处理工艺，通常有常温热处理和高温形变热处理两类，前者采用步进式连续加热炉，在保护气氛中将弹簧加热到 860 ~ 880℃，保温结束后油冷，在热风循环的连续回火炉（或）周期性回火炉中保温足够时间回火，回火温度为 380 ~ 420℃，回火后硬度为 46 ~ 52HRC。弹簧的高温形变热处理通常是进行感应加热，表面温度达到 950 ~ 1000℃，用模具轧成要求的形状和尺寸，热卷后再进行淬火和回火处理。该工艺生产率高，可获得超细晶粒和形变热处理强化效果。

在汽车的底盘上安装了各种各样的悬架弹簧，在受外力的作用时通过产生弹性变形将外力抵消，起到了缓冲的效果，同时要承受高应力作用，振动大，受到冲击或摇摆以及泥水、泥沙等腐蚀等。失效形式为断裂和应力松弛，会明显降低舒适性，因此弹簧必须具有足够的弹性和高的疲劳强度，其组织为回火托氏体。一般选用的材料有两类，即碳素弹簧钢和合金弹簧钢，其中具有代表性的钢种为 70、75、80、85 等和 65Mn、60Si2MnA、60CrMnA、30W4Cr2VA、50CrVA 等。

1. 汽车扭杆弹簧的热处理

扭杆弹簧是利用弹性变形而起到弹簧作用的零件，一端固定，另一端加上扭转载荷，即承受扭转应力的作用，选用的材料是 65Mn、60Si2MnA 等弹簧钢。具有结构简单，工作时无摩擦，弹簧特性稳定，不产生颤振，单位体积储能大，体积小，安装方便等特点。

扭杆弹簧的制造路线为切料→锻造→退火→端面加工→淬火→回火→喷丸处理→松弛处理→防锈处理。其热处理工艺有两种，其一为调质处理 830 ~ 890℃ 加热后油冷，当要求硬度 415 ~ 495HBW 时，回火工艺规范为 500℃ × 1h；热处理后的硬度要求为 47 ~ 52HRC 时，一般在 400℃ 左右回火 1h。需要注意的是在扭杆弹簧加热的过程中，应防止加热温度高、时间长出现过热现象，另外严禁表面氧化和脱碳。因此应在脱氧彻底的盐浴炉或可控气氛炉内完成加热过程。扭杆弹簧的高频

感应淬火作为一种新工艺已经得到了推广和应用，具有热处理变形小、表面不产生氧化和脱碳的优点，其缺点是硬化层深度浅。

2. 卡簧的热处理

卡簧有圆形、矩形两类，其端面平齐或弯曲，同心截面直径≤13mm 时，采用 75 钢；直径≥54mm 时采用 50CrVA、55SiCrA 等材料制作。

卡簧为线弹簧中最简单的一类零件，根据原材料状态，其所用材料分为热轧弹簧钢和冷轧弹簧钢，它们的热处理工艺不同。

(1) 热轧弹簧钢的热处理 在实际生产过程中，热轧弹簧钢的供应状态有退火和不退火两类，前者的基体硬度低，有较好的韧性和塑性，晶粒组织均匀性好，易于进行机械加工和成形，如弯制等，而后者表面硬度高，加工困难，适于制作各种中型的螺旋弹簧等，两者的使用规格和范围存在明显的区别。

① A 卡簧成形后进行等温淬火处理，采用 55SiCrA 等油冷淬火钢丝制成，冷成形温度为 260 ~ 280℃，并进行去应力退火处理。卡簧的淬火加热温度为 $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，在可控气氛炉或盐浴炉中实现基本无氧化加热，确保弹簧表面状态不发生变化，加热的时间根据装炉量、温度和炉膛的大小来确定，通常的经验是其加热系数为 2min/mm、0.5min/mm。根据弹簧的直径和厚度选择卡簧的冷却方法，可选择油冷或在 350 ~ 400℃的硝酸盐浴中等温淬火。

为保证弹簧的弹性合格和硬度符合技术要求，卡簧回火的温度控制在 400 ~ 500℃，保温 30 ~ 90min，所用热处理设备为油炉、硝酸盐炉或可控气氛炉，保证组织完全转变，为防止出现第二类回火脆性，回火结束后应油冷或水冷。

② 表面磷化处理后再在防锈液中浸泡。

③ 热处理后的金相组织。当进行等温淬火时，获得下贝氏体组织，油淬火则得到均匀的回火马氏体。不同料径的卡簧对硬度的具体要求见表 5-13。

表 5-13 不同料径的卡簧对硬度的具体要求

卡簧料径 d/mm	20 ~ 42	42 ~ 50	50 ~ 54	54 ~ 80
硬度 (HRC)	50 ~ 55	48 ~ 54	47 ~ 54	47 ~ 54

④ 卡簧经等温淬火处理后，得到了下贝氏体组织，具有高的硬度和良好的综合力学性能。常见卡簧贝氏体等温淬火工艺参数见表 5-14。

表 5-14 常见卡簧贝氏体等温淬火工艺参数

材 料	淬火温度/℃	等温温度/℃	等温时间/min	硬度 HRC
75	800 ~ 850	260 ~ 280	10 ~ 20	48 ~ 52
T9A		315 ~ 335	10 ~ 20	43 ~ 48
T10A		320 ~ 360	15 ~ 30	40 ~ 48

(续)

材 料	淬火温度/℃	等温温度/℃	等温时间/min	硬度 HRC
65	820 ~ 860	260 ~ 280	15 ~ 30	≈50
65Mn		320 ~ 350		46 ~ 48
60Si2MnA	860 ~ 880	280 ~ 320	30	48 ~ 52
50CrVA	860 ~ 900	300 ~ 320	30	48 ~ 52
55SiCrA	860 ~ 900	300 ~ 320	30	48 ~ 52

(2) 冷轧弹簧钢的热处理 制作小型弹簧常采用冷拔钢丝，材料的选择与处理如下：

① 采用铅浴加热淬火处理，采用 60、65、70、75、80、60Mn、70Mn、T8MnA、T9A 等。

② 冷拔钢丝采用碳素钢和锰钢制造，用于性能要求不高的弹簧。

③ 油淬火钢丝采用铬钒钢、铬硅钢和碳素钢制造，在冷拔后进行热处理（淬火和回火）。

上述三种钢丝卷成弹簧后无须再进行淬火和回火处理，仅仅需要对弹簧进行定型去应力退火。

④ 冷拔合金钢丝。该类用铬钒钢、铬硅钢和硅锰钢制的钢丝，在卷制成弹簧后进行热处理（淬火和回火处理），来提高基体的疲劳强度和弹性极限。

其他常见弹簧的热处理工艺见表 5-15。

表 5-15 其他常见弹簧的热处理工艺

材 质	工 艺 规 范				力 学 性 能			
	淬 火		回 火					
	温度/℃	淬火冷却介质	温度/℃	淬火冷却介质	R_m /MPa	R_{cu} /MPa	A (%)	Z (%)
75	820	油	480	油	1100	900	7	30
60Si2Mn	830		480		1200		8	25
65Mn	830		540		1000	800	8	30
55SiMnVB	870		480		1300	1200	5	25
50CrVA	850		500		1300	115	10	40
55CrMnA	880		550		1400	130	6	30

1) 60Si2MnA 钢吊挂弹簧的热处理工艺如图 5-12 所示。

2) 65Mn 钢螺旋弹簧直径小，经冷卷成形，其流程为冷卷→定型处理→切断修正→淬火→矫正回火→机械修正→定型回火→机械加工→喷砂→表面处理。常规的热处理工艺曲线如图 5-13 所示。

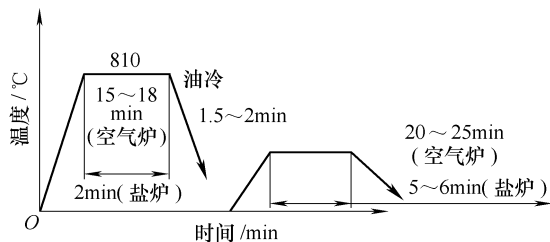


图 5-12 60Si2MnA 钢吊挂弹簧的热处理工艺

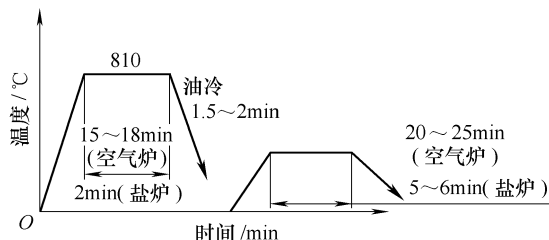


图 5-13 65Mn 钢螺旋弹簧的热处理工艺曲线

采用上述工艺处理的弹簧的回火硬度为 42 ~ 48HRC。该类弹簧热处理后要进行提高疲劳强度的喷丸或喷砂处理，同时也将表面粘附的盐渣、氧化皮等清理干净。

65Mn 钢螺旋弹簧的热处理回火技术要求见表 5-16。

表 5-16 65Mn 钢螺旋弹簧的热处理回火技术要求

回火温度/℃	回火后硬度 HRC	备 注
230 ~ 260	48 ~ 50	回火后均油冷或水冷，弹簧的强度和弹性随温度的不同而发生明显的变化，具体要求应依据图样或工艺来确定
340 ~ 360	42 ~ 45	
370 ~ 400	39 ~ 43	
410 ~ 430	37 ~ 49	

5.4 轮辋和轮毂的热处理

汽车车轮位于轮胎和车轴之间，它的作用是承受汽车的重力、行驶中的侧向力、滚动阻力、横向力以及驱动制动转矩等，是负荷旋转的重要组件。汽车车轮一般由轮辋（或钢圈）、轮毂、轮盘、轮胎和联接螺栓等几部分组成，其中轮辋（或钢圈）用来安装和支承轮胎，而与之相连的轮辐则位于车轴和轮辋之间，起到支承作用，轮毂通过圆锥滚柱轴承装在半轴导管或转向节轴上，轮盘是用来连接轮毂

和轮辋的。车轮作为汽车行驶系统中的重要部件，应具有以下功能：能够完全支承整车质量，确保汽车的正常行驶；缓和路面传来的冲击力和减少噪声，可减少汽车的振动和增加舒适感；通过轮胎与路面之间存在的附着作用，增大行驶中的附着力，产生驱动和制动力；转弯时可产生侧向力，通过车轮产生的自动转正力矩，使汽车保持直线方向行驶；具有升降和提高超高性的作用；承受车辆行驶时的垂直和侧向载荷，要求耐疲劳、质量轻。

轮辐和轮毂采用钢板、铸铁、铝合金等制造，轮辋和轮辐的结合采用铆接、定位焊、二氧化碳保护焊等，轮辐的强度取决材料、拉伸率和加工方法，其中 95% 以上的采用钢板轮辐。

下面分别介绍轮辋、轮毂热处理工艺的制订和有关注意事项，以便于分析和了解两种零件的特点和作用。

5.4.1 轮辋（或钢圈）

汽车车轮轮辋通常经下料卷圈、闪光对焊、水冷、去毛刺、扩孔、滚形扩张、打充气孔等工序完成，轮辐经正压拉深、反拉深、镦压整形、冲孔、修边、冲螺栓孔、挤球面翻边等工序完成。采用 CO_2 保护焊将轮辋和轮辐组装成车轮，实体车轮必须达到规定的台架疲劳试验次数才能装车使用。

车轮构造如图 5-14 所示，可以看出它是由轮盘 6、轮辋 2 和挡圈 1 组成的。其中轮盘是由低碳钢板冲压成形的，通常采用正火处理，或铸造而成，用来连接轮辋和轮毂，多用于载货汽车等，要求具有高的强度和良好的支承作用。轿车车轮使用薄的钢板制造或采用铝合金铸造，具有其质量轻、基体强度高特点。

铁素体与马氏体组成的一种低合金高强度双相钢，具有屈服强度低、强塑性配合和抗疲劳性能好以及易冲压成形等特点，被广泛应用于汽车工业。轮辋承受交变载荷的作用，其主要失效形式为疲劳破坏。

轮辋的热处理包括正火与调质处理，这里不再赘述。

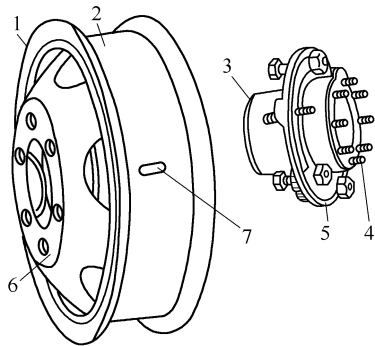


图 5-14 汽车车轮的构造

1—挡圈 2—轮辋 3—轮辐 4—螺栓
5—凸缘 6—轮盘 7—气门嘴伸出

5.4.2 轮毂

1. 铝合金轮毂的热处理

铸造铝合金轮毂占铝合金轮毂生产总数的 80%，而热处理对轮毂的机械性能

有很大的影响。铸造铝合金轮毂具有质量轻、能减振、外形美观等优点。据统计,铝合金轮毂与钢轮毂相比可减轻质量 30% ~ 40%。使用铝合金轮毂还能改善轿车的行驶性能,减轻车辆的振动。

铝合金轮毂包括铸造铝合金轮毂与锻造铝合金轮毂,具有较高的机械强度和疲劳强度。其中铸造铝合金轮毂应用最为广泛,其热处理工艺流程为:固溶(加热→保温→水冷)→时效(加热→保温→空冷)→检验。ZL101A 等为铝硅系铸造铝合金,具有外形美观、耐腐蚀、质量轻、散热快、加工精准、材料利用率高的特点,符合现代汽车安全、节能、环保等的要求。

铝合金轮毂热处理后的性能指标有塑性及硬度:ZL101A 铸造轮毂在铸态下性能较低,抗拉强度一般在 200MPa 以下,塑性为 2% ~ 6%,硬度低于 60HBW,需要通过 T6 热处理才能提高强度和硬度,提高塑性,改变力学性能。

铸造铝合金轮毂的技术要求为抗拉强度大于 200MPa,硬度大于 70HBW,伸长率大于 7%。铝合金轮毂的热处理包括固溶处理、完全时效处理或不完全时效处理。采用的设备为井式电炉、箱式电炉、铝合金车轮专用热处理生产线、专用连续生产线如风处理生产线等。

铸造铝合金轮毂采用的热处理工艺为 T6,即固溶处理 + 人工时效和固溶处理后沸水处理 + 人工时效两种,实际生产过程中采用的热处理工艺为后一种:固溶工艺 $(540 \pm 3)^{\circ}\text{C} \times 5 \sim 6\text{h}$,在 $50 \sim 70^{\circ}\text{C}$ 的水中冷却,时效工艺为 $(180 \pm 5)^{\circ}\text{C} \times 5 \sim 6\text{h}$ 空冷,进行校直处理。

铸造铝合金轮毂的失效原因(指材料力学性能没有达到要求)为:原材料镁含量过高,处理工艺不当即热处理温度(固溶)高等造成晶粒粗大等。

2. 铸铁轮毂的热处理

(1) 轮毂的预备热处理 CA15 车汽车前轮轮毂采用 KTH350-10 制造,如图 5-15 所示。要求抗拉强度 $\geq 350\text{MPa}$,伸长率 $\geq 10\%$,硬度 $\leq 150\text{HBW}$ 。该铸件热处理的目的是消除碳化物,获得铁素体和团絮状石墨,提高力学性能,改善加工性能等。为此采用的热处理工艺为高温石墨化退火,其热处理工艺曲线如图 5-16 所示。热处理后的抗拉强度为 400MPa,伸长率为 18%,硬度为 143HBW。

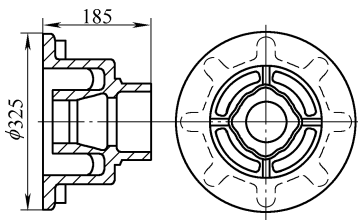


图 5-15 前轮轮毂 (CA15 车) 示意图

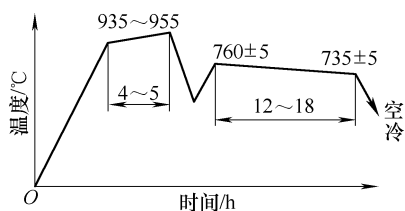


图 5-16 前轮轮毂 (CA15 车) 热处理工艺曲线

载货汽车轮毂也可采用 QT500-7 球墨铸铁制造，要求抗拉强度为 450 ~ 500MPa，伸长率为 10% ~ 18%，冲击韧度为 80 ~ 120J/cm²，硬度为 150 ~ 200HBW，其金相组织为 90%（体积分数）的铁素体 + 珠光体。采用的热处理工艺为 920℃ × 1h + 720℃ × 5h，炉冷至 620℃ 空冷。

(2) 表面淬火处理 从车轮的性能要求可知，轮毂要有较高的强度、良好的塑性和一定的韧性，才能满足其工作需要，通常选用的材料有可锻铸铁、铸钢与球墨铸铁等，材料牌号如 KTH350-10、KTH370-12、ZG270-500、ZG310-570、QT500-7 等，铸造生产方便、成本低廉，具有良好的流动性和优良的切削加工性。轮毂的油封面要进行淬火，正火处理后进行中频或高频感应淬火，其中对铸态可直接淬火，其感应淬火的工艺规范见表 5-17，其中功率因数为 0.9，栅极电流为 0.55A。

表 5-17 轮毂表面淬火处理的工艺规范

工艺方法	设备型号	阳极电压 /V	阳极电流 /A	功率 /kW	加热时间 /s	冷却时间 /s
高频感应淬火	GP60-CP14	13	2.6	60	8	6
中频感应淬火	BPSD-160/8000	600	180	80	1.5	1.5

轮毂经不同热处理工艺后的质量见表 5-18。

表 5-18 轮毂高频感应淬火和中频感应淬火产品质量的比较

工艺方法	硬化层厚度 /mm	硬化层长度 /mm	奥氏体晶粒度 /级	表面硬度 HRC
高频感应淬火	1.3 ~ 1.8	17	5	53 ~ 55
中频感应淬火	1.78 ~ 2.0	18	4	53 ~ 55

灰铸铁的中小型铸态零件可以直接进行感应淬火，达到表面强化的目的。强度不高而要求耐磨的零件只进行感应淬火即可。

3. 热处理工艺分析与操作要点

1) 铸造铝合金轮毂热处理后要获得要求的组织与力学性能，在固溶与时效温度的控制上要符合工艺要求，其温差较小，故应选择炉温均匀性符合要求的热处理加热设备。

2) 需要注意的是影响铸造铝合金轮毂固溶处理效果的因素包括加热温度、保温时间和冷却速度，另外时效强化的效果取决于合金的成分、固溶体特性、过饱和度、分解特性和强化相的特性等，而影响时效效果的工艺因素包括温度、时间、固溶温度、冷却速度等。因此需要严格进行工艺试验，以确定最佳的热处理工艺。

3) 固溶转移时间长会引起机械性能降低，考虑到设备等因素，通常应小于

30s。水温过高机械性能下降,而过低则内应力增大,容易产生变形等,推荐水温为 50 ~ 70℃。

4) 进行高温石墨化退火时要清除上炉残留的氧化皮和积沙等,同时将铸件毛刺铲平,铸件均匀和平稳摆放。

5) 前轮轮毂(CA15 车)热处理摆放示意图如图 5-17 所示。操作时要严格执行工艺规范,及时调整仪表控制温度,进行准确控制。

6) 高频感应或中频感应淬火后,要及时进行回火处理,防止因应力大而产生裂纹。

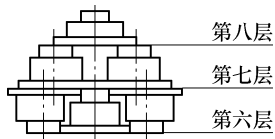


图 5-17 前轮轮毂 (CA15 车)
热处理摆放示意图

参 考 文 献

- [1] 林信智,杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- [2] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册:第 2 卷 [M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 寇东海,段铁树,王振平. 汽车前桥、转向系的保养与修理 [M]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [5] 浙江大学,上海机械学院,合肥工业大学. 钢铁材料及其热处理工艺 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1975.
- [6] 赵德寅,王大伦. 汽车零件金相分析 [M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [7] 熊明寿. 汽车概论 [M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [8] 陈矿,等. 铸造铝合金轮毂 T6 热处理工艺的优化研究 [J]. 热加工工艺:2006,35 (6):30-32.

第 6 章

转向系统与制动系统零部件的热处理

6.1 概述

1. 汽车转向系统的作用与要求

汽车上用来改变或保持汽车行驶方向（即控制汽车行驶方向）的专设机构称为汽车转向系统（Steering system）。汽车转向系统的功能就是按照驾驶员的意愿控制汽车的行驶方向，并减轻驾驶员的疲劳强度，其对汽车的行驶安全至关重要，汽车转向系统的零件都称为保安件。

汽车转向系统分为两大类：机械转向系统和动力转向系统。完全靠驾驶员手力操纵的转向系统称为机械转向系统，借助动力来操纵的转向系统称为动力转向系统。动力转向系统又可分为液压动力转向系统和电动助力动力转向系统。

转向系统包括转向操纵机构、转向器、转向传动机构等。

1) 转向操纵机构。机械转向系统的转向操纵机构主要由转向盘、转向轴、转向管柱等组成，它的作用是将驾驶员转动转向盘的操纵力传给转向器。

2) 转向器。转向器是将转向盘的转动变为转向摇臂的摆动或齿条轴的直线往复运动，并对转向操纵力进行放大的机构。转向器一般固定在汽车车架或车身上，转向操纵力通过转向器后一般还会改变传动方向。

3) 转向传动机构。将转向器输出的力和运动传给车轮（转向节），并使左右车轮按一定关系进行偏转的机构。

汽车转向系统示意图如图 6-1 所示。其中转向器是将操纵机构的旋转运动转变为传动机构的直线运动（严格讲是近似直线运动）的机构，是转向系统的核心部件。转向器由转向盘、转向轴、啮合传动副、转向臂轴、壳体等组成。

转向传动机构由转向垂臂、纵拉伸杆、转向节臂、转向横拉杆、左右梯形臂等

组成。

4) 动力转向系统。动力转向系统是兼用驾驶员体力和发动机(或电动机)的动力为转向能源的转向系统,它是在机械转向系统的基础上加设一套转向加力装置而形成的。动力转向系统的组成转向盘、安全转向轴、转向中间轴、转向油管、转向油泵、转向节、转向轮、转向节臂、转向横拉杆、转向摇臂、机械转向器、转向纵拉杆和转向减振器等。

需要注意的是,转向系统中的许多零部件采用金属材料制作,为了满足其耐磨、抗弯等技术要求,应采用适当的热处理,以获得表面或整体的力学性能。

2. 汽车的制动系统的作用与要求

汽车制动系统是为了在技术上保证汽车的安全行驶,提高汽车的平均行驶速度等,而在汽车上专门安装的制动装置。一般来说,汽车制动系统包括行车制动装置和停车制动装置两套独立的装置。

行车制动装置的功用是使正在行驶中的汽车减速或在最短的距离内停车。而驻车制动装置的功用是使已经停在各种路面上的汽车保持不动。但是,有时在紧急情况下,两种制动装置可同时使用从而增强汽车制动的效果。

关于防抱死制动系统(Anti-lock Braking System, ABS),这里作部分介绍,据统计,汽车突然遇到情况踩制动踏板时,驾驶员往往会将制动踏板踩到底进行紧急制动,这时候汽车十分容易产生滑移并发生侧滑,这是一种非常容易造成车祸的现象。造成汽车侧滑的最根本的原因是汽车在紧急制动时车轮轮胎与地面的滚动摩擦会突然变为滑动摩擦,轮胎的抓地力几乎丧失。针对这种产生侧滑现象的根本原因,汽车专家就研制出车用ABS这样一套防滑制动装置。ABS的功能主要是在物理性能的极限范围内,保证制动时车辆本身的操纵性及稳定性。同时,在加速的时候,也能防止轮胎的纯滑移,提高了加速性能和操作稳定性,故得到了极为广泛的应用。

(1) 制动系统的分类 它包括行车制动系统、驻车制动系统、辅助制动系统以及应急制动系统等。

1) 行车制动系统是由驾驶员用脚来操纵的,故又称脚制动系统。它的功用是

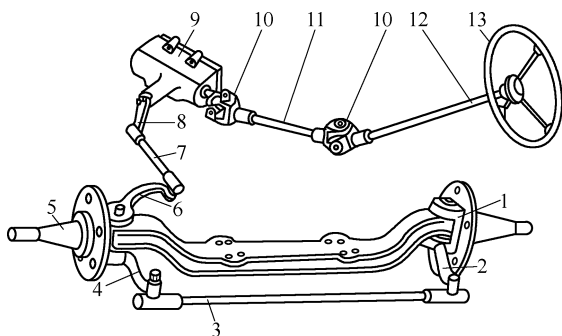


图 6-1 汽车转向系统结构示意图

- 1—右转向节 2、4—梯形臂 3—转向横拉杆 5—左转向节
6—转向节臂 7—转向纵拉杆 8—转向垂臂 9—转向器
10—转向节 11—转向传动轴 12—转向轴 13—转向盘

使正在行驶中的汽车减速或在最短的距离内停车。

2) 驻车制动系统是由驾驶员用手来操纵的, 故又称手制动系统。它的功用是使已经停在各种路面上的汽车驻留原地不动。

3) 辅助制动系统是在行车制动系统失效的情况下, 保证汽车仍能实现减速或停车的一套装置。在许多国家的制动法规中规定, 第二制动系统也是汽车必须具备的。经常在山区行驶的汽车以及某些特殊用途的汽车, 为了提高行车的安全性和减轻行车制动系性能的衰退及制动器的磨损, 采用辅助制动系统在下坡时稳定车速。

4) 应急制动系统在行车制动系统失效时, 紧急使汽车降速或停车。按照制动能源情况, 制动系统还可分为人力制动系统、动力制动系统和伺服制动系统 3 种。人力制动系统是以驾驶员的肌体作为唯一的制动能源的制动系统, 动力制动系是完全靠由发动机的动力转化而成的气压或液压形式的势能进行制动的制动系统, 伺服制动系统则是兼用人力和发动机动力进行制动的制动系统。

(2) 制动系统的组成 制动系统一般由制动操纵机构和制动器两个主要部分组成。

1) 制动操纵机构的作用是产生制动动作、控制制动效果并将制动能量传输到制动器。

2) 制动器是产生阻碍车辆运动或运动趋势的力(制动力)的部件。汽车上常用的制动器都是利用固定元件与旋转元件工作表面的摩擦而产生制动力矩的, 称为摩擦制动器, 分为鼓式制动器和盘式制动器两种结构形式。

一般制动系统的基本结构主要由车轮制动器和液压传动、气压传动机构组成。

1) 车轮制动器主要由旋转部分、固定部分和调整机构组成, 旋转部分是制动鼓; 固定部分包括制动蹄和制动底板; 调整机构由偏心支承销和调整凸轮组成, 用于调整蹄鼓间隙。

2) 液压传动机构主要由制动踏板、推杆、制动主缸、制动轮缸和管路组成。

3) 气压传动机构主要由制动踏板、推杆、制动总阀、空气干燥器、四回路保护阀、制动气室和管路等组成。

(3) 制动系统的形式 制动系统按形式分为鼓式制动系统和碟式制动系统。

1) 鼓式制动系统是一种传统的制动系统, 汽车上的鼓式制动系统是由制动油泵、活塞、制动片和鼓室组成的, 制动时由制动分泵的高压制动油推动活塞, 对两片半月形的制动蹄片施加作用力, 使其压紧鼓室内壁, 靠摩擦力阻止制动鼓转动从而达到制动效果。由于鼓式制动片密封于制动鼓内, 造成制动片磨损后的碎屑无法散去, 影响制动鼓与制动片的接触面从而影响制动性能。

2) 碟式制动系统是由制动油泵、一个与车轮相连的制动圆盘和圆盘上的制动卡钳组成的。制动时, 高压制动油推动卡钳内的活塞, 将制动蹄片压向制动盘从而产生制动效果。

由于制动系统没有密封,因此制动磨损的细屑不会沉积在制动系统上,碟式制动系统的离心力可以将一切水、灰尘等污染向外抛出,维持一定的清洁。此外碟式制动系统的零件独立在外,要比鼓式制动系统更易于维修。

碟式制动系统有时也称为盘式制动系统,它分为普通盘式制动系统和通风盘式制动系统两种。

通风盘式制动系统是在两块制动盘之间预留出一个空隙,使气流在空隙中穿过,有些通风盘还在盘面上钻出许多圆形通风孔,或是在盘面上割出通风槽或预制出矩形的通风孔。通风盘式制动系统利用风流作用,其散热效果要比普通盘式制动系统更好。碟式制动系统的主要优点是在高速制动时能迅速制动,散热效果优于鼓式制动系统,制动效能的恒定性好,便于安装像ABS那样的高级电子设备。鼓式制动系统的主要优点是制动蹄片磨损较少、成本较低、便于维修,由于鼓式制动系统的绝对制动力远远高于碟式制动系统,所以普遍用于后轮驱动的载货汽车上。

(4) 制动器类别 汽车制动器分为鼓式制动器和盘式制动器,也有分为盘式、鼓式与带式三种的。汽车所用的制动器几乎都是摩擦式的。鼓式制动器摩擦的旋转部件为制动鼓,其制动的工作表面为外圆柱面;盘式制动器的旋转部件则为旋转的制动盘,以端面为制动工作表面。

1) 鼓式制动器包括轮缸式制动器、凸轮式制动器与楔块式制动器。典型的鼓式制动器主要由底板、制动鼓、制动蹄、轮缸(制动分泵)、回位弹簧、定位销等零部件组成。底板安装在车轴的固定位置上,它是固定不动的,上面装有制动蹄、轮缸、回位弹簧、定位销,承受制动时的旋转扭力。每一个鼓有一对制动蹄,制动蹄上有摩擦衬片。制动鼓安装在轮毂上,是随车轮一起旋转的部件,它由一定质量的铸铁做成,形状似圆鼓状。制动时,轮缸活塞推动制动蹄压迫制动鼓,制动鼓受到摩擦减速,迫使车轮停止转动。

其中凸轮式制动器应用十分广泛,所有国产汽车及部分外国汽车的气压制动系统中,都采用鼓式促动的车轮制动器,而且大多设计成领从蹄式。制动时,制动调整臂在制动气室的推杆作用下,带动凸轮轴转动,使得两制动蹄压靠到制动鼓上而制动。由于凸轮轮廓的中心对称性及两蹄结构和安装的轴对称性,凸轮转动所引起的两蹄上相应点的位移必然相等。这种由轴线固定的凸轮促动的领从蹄式制动器是一种等位移式制动器,制动鼓对制动蹄的摩擦使得领蹄端部力图离开制动凸轮,从蹄端部更加靠紧凸轮。因此,尽管领蹄有助势作用,从蹄有减势作用,但对等位移式制动器而言,正是这一差别使得制动效能高的领蹄的促动力小于制动效能低的从蹄的促动力,从而使得两蹄的制动力矩相等。

2) 盘式制动器近年来应用比较广泛。汽车速度在不断提高,载货汽车和大客车的总重不断增加。另外,轿车的重心普遍降低和广泛采用小直径、宽断面的轮

胎,使制动器安装位置受到限制,因此在重型载货汽车和轿车上采用制动时散热性能较好的盘式制动器的日益增多。盘式制动器可分为钳盘式制动器和全盘式制动器两种。

盘式制动器又称为碟式制动器,它由液压控制,主要零部件有制动盘、分泵、制动钳、油管等。制动盘用合金钢制造并固定在车轮上,随车轮转动。分泵固定在制动器的底板上固定不动。制动钳上的两个摩擦片分别装在制动盘的两侧。分泵的活塞受油管输送来的液压的作用,推动摩擦片压向制动盘发生摩擦制动,动作就像用钳子钳住旋转中的盘子,迫使它停下来一样。这种制动器散热快,重量轻,构造简单,调整方便,特别是高负载时耐高温性能好,制动效果稳定,而且不怕泥水侵袭,在冬季和恶劣路况下行车,盘式制动比鼓式制动更容易在较短的时间内使车停下。有些盘式制动器的制动盘上还开了许多小孔,以加速通风散热,提高制动效率。而鼓式制动器由于散热性能差,在制动过程中会聚集大量的热量,制动蹄片和轮鼓在高温影响下较易发生极为复杂的变形,容易产生制动衰退和振抖现象,导致制动效率下降。

6.2 转向操纵机构的热处理

汽车的转向操纵机构主要包括转向盘、转向轴和转向管柱等。在汽车行驶的过程中,任何来自转向管柱的异响、卡滞和变形过大都会给驾驶员造成很大的心理压力,影响行车安全。转向管柱主要包括转向轴总成。

转向轴为连接转向盘和转向器的传动件,传递转矩,转向轴从转向柱管中穿过,支承在柱管内轴承和衬套上。

转向轴材料多选用无缝钢管,分为上下两段,中间用柔性万向节连接。选用渗碳钢、中碳钢或中碳合金钢等,如 20Cr、20CrMnTi、30Cr2Ni2Mo、40Cr、42CrMo、45 等。

1. 中碳钢或中碳合金钢转向轴的热处理

机械加工工艺路线为:下料→落料→模锻→正火→粗加工→调质→半精加工→局部高频感应淬火→精加工→检验→无损检测。

材料为 42CrMo 钢时,调质处理(850℃ 淬火油冷,540℃ 回火)硬度为 269~302HBW。

材料为 30Cr2Ni2Mo 钢时,调质处理(920℃ 淬火油冷,540℃ 回火)硬度在 302HBW 以上。

转向轴材质为 35、45、40Cr 钢时,模锻毛坯,在加工前经正火处理改善加工性能后再进行加工,零件的热处理要求为调质处理。其技术要求为整体调质处理硬度为 28~33HRC,按要求局部高频感应淬火后硬度为 48~50HRC。

需要注意采用整体调质工艺的不足之处是：零件整体调质处理的能耗大，工作量大，成本高；水淬零件变形大，油淬热处理效果差；整体调质处理后，零件变形大，需增加校正工序，这样要耗费大量的物力人力，操作也非常麻烦。

2. 渗碳钢转向轴的热处理

转向轴采用 20CrMnTi 渗碳钢制造时，要求渗层深度为 0.6 ~ 1.0mm，热处理后表面硬度为 56 ~ 62HRC。预备热处理为调质，该汽车转向轴要求碳化物级别为 1 ~ 4 级，残留奥氏体 + 马氏体级别为 1 ~ 5 级，热处理设备为连续生产炉，其渗碳工艺包括：强渗 $920^{\circ}\text{C} \times 120\text{min}$ ，碳势 1.1%；扩散 $920^{\circ}\text{C} \times 30\text{min}$ ，碳势 0.85%。渗碳后进行高频感应淬火处理或整体淬火 + 低温回火处理。

6.3 转向传动机构的热处理

转向传动机构是指转向器至转向轮之间的一整套传动杆件。其功能是将转向器输出的力传给转向轮，使之偏转以实现汽车的转向。

汽车的转向传动机构的作用是通过转动转向盘，改变汽车的行驶方向，并减轻驾驶员的疲劳强度。由图 6-1 可以看到，转向传动机构由转向垂臂、纵拉杆、转向节臂、横拉杆和左右梯形臂等组成，下面着重介绍拉杆、转向传动轴的特性和热处理技术要求等。

6.3.1 转向横拉杆

转向横拉杆安装在转向桥的后方或前方，两端与梯形臂进行球形铰链连接，是连接左、右梯形臂的杆件，为传动杆件，将转向摇臂传来的力和运动传给转向梯形臂（或转向节臂）。

其作用为在汽车转向时，使左右转向轮同向偏转和调整前轮前束。图 6-2 所示为解放 CA141 型汽车的横拉杆，它由三段组成。两头的空心接头制有与拉杆螺纹相配的内螺纹，中间的拉杆为实心轴，球头销的尾部与梯形臂相连。拉杆在调整转向轮的过程中要承受弯曲和扭转力矩的作用，因此该拉杆应具有较高的强度和一定的韧性，一般采用 45 钢等中碳钢等进行调质处理即可满足其工作要求。

6.3.2 转向纵拉杆

转向纵拉杆也称转向主拉杆、转向直拉杆等，它是连接转向垂臂和转向节上节臂的连接杆，它在汽车行驶过程中反复承受拉力和压力，因此多用高强度冷拉钢管制造。

图 6-3 所示为解放 CA141 型汽车的转向纵拉杆。从图中可知，纵拉杆由两端

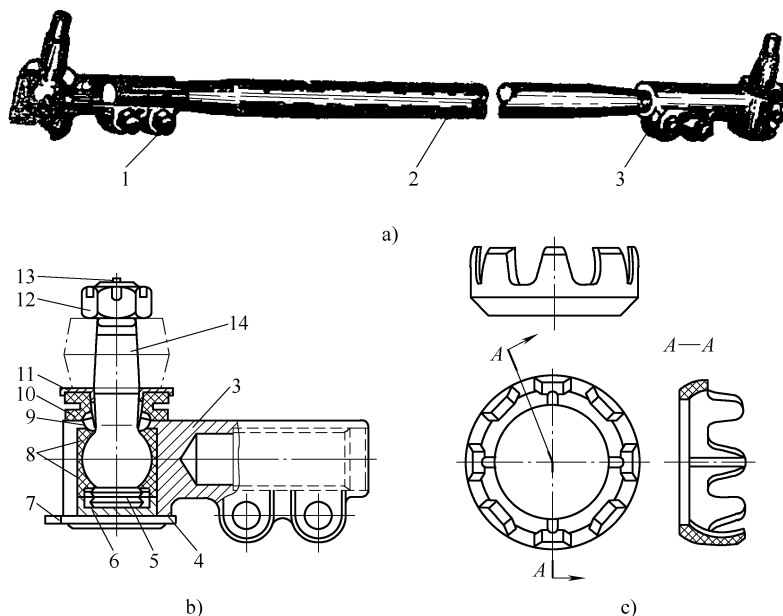


图 6-2 解放 CA141 型汽车横拉杆示意图

a) 转向横拉杆 b) 接头 c) 球头座

1—夹紧螺栓 2—横拉杆体 3—横拉杆接头 4—弹簧座

5—弹簧 6—螺塞 7—限位销 8—球头座 9—防尘罩

10—防尘垫 11—防尘垫座 12—槽形螺母

13—开口销 14—球头销

扩大的钢管制成，两端的球关节分别与铰链和转向垂臂连接。纵拉杆两端的弹簧装在球头销的同一侧，以保证其在受到向前或向后的冲击力时，都有一根弹簧起缓冲作用。其受力比较复杂，在工作过程中既要受到两端球头的拉伸作用，又要承受扭转力的作用，反复的载荷作用要求该零件必须具有以下特性：具有足够的强度和韧性，疲劳强度高；两端有高的硬度和良好的耐磨性。选用 45、40Cr 等调质钢制造，调质处理后零件两端进行高频感应淬火处理，即可满足其工作需要。

在高频感应淬火时，转向器摇臂轴的扇形齿部形状特殊，难以控制，易发生淬火开裂，质量受到很大影响。花键部位连续加热高频感应淬火后，在 360℃ 进行回火处理。扇形齿部形状特殊，高频感应淬火时既不能旋转，也不能上下移动，所以连续加热时只好采用专用感应器进行同时加热淬火。两轴颈处分两次连续加热进行高频感应淬火，然后连同淬火后的齿部一起进行 180℃ 回火。

经上述工艺处理后，花键和两轴颈处均能达到技术要求，但扇形齿部的加热透热层不能按齿形轮廓线分布，因此为使表面达到要求的淬火温度，需要延长加热时间，以致整个齿部几乎都淬透。

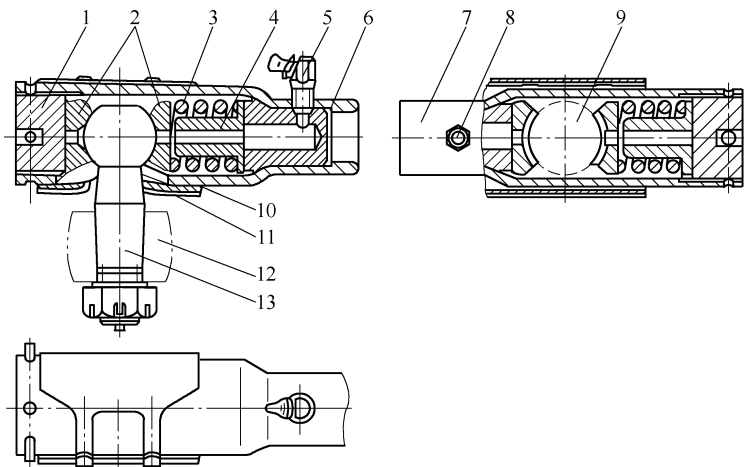


图 6-3 解放 CA141 型汽车的转向纵拉杆

1—螺塞 2—球头销座 3—弹簧 4—弹簧座 5、8—油嘴 6—座塞 7—纵拉杆
9、13—球头销 10—油封垫 11—油封垫护罩 12—转向垂臂

6.3.3 部分转向部件

1. 传动轴

汽车传动轴的主要作用是支撑回转体、传递动力。一般会承受交变转矩及拉压载荷，轴颈与键部位承受较大的摩擦与磨损。失效形式主要是断裂与局部过度磨损，断裂包括疲劳断裂与过载断裂。

根据其服役条件，选用材料应具有足够的强度、刚度和一定的韧性，良好的耐磨性，高的疲劳强度，以及良好的切削加工性，即要求传动轴具有良好的综合力学性能。汽车传动轴的材质通常选用中碳钢（合金结构钢）如 40Cr、35CrMoA 等，其中 35CrMoA 的特点是表面淬火硬度为 40~50HRC，强度高，韧性高，淬透性高。

中碳钢经过适当的热处理（调质、表面淬火、渗碳等）可获得良好的综合力学性能，达到心部韧性高、表面耐磨的要求。最终热处理后表面硬度为 40~50HRC。

合金调质钢经过热处理（调质、淬火）具有高强度、高耐磨性与良好的塑性、韧性的配合，即具有良好的综合力学性能。最终热处理后表面硬度为 40~50HRC。

2. 转向节臂

汽车在行驶过程中，经常要改变行驶方向（转向）。通常，车辆在转向时，驾驶员对转向盘施加一个转向力矩，该力矩通过转向轴、传动轴、转向器，经转向器放大后，该力矩传入转向摇臂，再通过转向纵拉杆传给转向节和转向节上的转向节臂，最后传入轮毂，使车轮偏转。由此可以看出，转向节臂有连接纵拉杆和轮毂的作用，把转向器输出的力和运动传给纵拉杆或横拉杆，进而推动转向轮偏转，有转

向功能。

汽车转向节臂是一个异形件又是一个保安件,选用材质为 40Cr、42CrMo 等中碳合金钢。转向节臂最终的热处理状态为调质处理状态,要求调质处理后硬度为 285 ~ 321HBW。

机械加工工艺流程为:下料→锻造→调质(网带炉加热,840℃油冷,560℃回火)→机械加工→表面涂装。

40Cr、42CrMo 进行淬火时,可选用双液淬火,其容易淬裂,要注意出淬火冷却介质的温度不能太低,否则会造成零件的开裂。另外,转向节臂材料表面如存在氧化皮等锻造缺陷,且调质处理后材料的显微组织不满足技术条件,则会造成该零件在使用过程中发生早期断裂,造成失效。

3. 梯形臂

它使汽车转向系统横拉杆上的力转化为绕主销转动,通过横拉杆把左、右车轮连接起来,把绕主销转动的力矩转化为推力,保证车轮作正确的运动。梯形臂是锻件,材料为 40MnB,调质处理后硬度为 241 ~ 285HBW,大端用螺栓固定在转向节上,通过平键和锥传递力矩;小端带有锥度。驾驶员施于转向盘上的力,通过它传给转向传动机构,再通过左梯形臂、横拉杆和右梯形臂带动右转向节围绕主销向同一方向偏转。于是,由转向臂轴传来的力通过这套机构传给转向轮,使安装在转向节上的两前轮同时发生偏转。

6.4 制动(摩擦)片和制动凸轮的热处理

1. 工作条件和技术要求

制动(摩擦)片和制动凸轮为汽车制动的传动部件,在工作过程中承受摩擦和冲击载荷的作用。其耐磨性要好,应具有足够的强度及弹性极限,故一般多采用渗碳钢、弹簧钢制作。其中汽车制动装置中使用的制动蹄摩擦片在刹车过程中要承受剧烈的磨损,图 6-4 所示为制动系统工作原理示意图。摩擦片与制动鼓二者正确的接触至关重要。制动凸轮为一半月形的装置,具体如图 6-5 所示,在拉床上成形。凸轮部分全部淬火,轴径部分淬火处理,凸轮部分在制动时依靠液压驱动凸轮撑开与车轮接触,产生摩擦作用,迫使车轮转动,来达到制动的目的。因此,制动凸轮表面应具有高的硬度才能提高耐磨性,从而延长制动凸轮的使用寿命。制动器主要分为鼓式和盘式两种,均采用 45 钢或灰铸铁制造,前者用于中、轻型载货汽车,而后者适合轿车的前后轮制动。鼓式制动器的制动蹄为半月形,装上摩擦片在另一端施加动力,制动蹄有适当的刚性,有的采用钢板焊接而成或经过热处理,组成鼓式制动器的摩擦副中旋转零件为制动鼓,其工作表面为外圆柱面。常用的摩擦片是由橡胶、合成树脂等粘结剂(主要为沥青、干性油或天然橡胶等)胶结石棉

而成的。盘式制动器则利用摩擦材料来夹紧圆盘,构成制动器的骨架,另外采用金属制动(摩擦)片同样可达到制动车轮的效果。

2. 材料的选用

制动片和制动凸轮构成汽车的制动装置,制动片的表面在制动过程中发热,制动(摩擦)片有金属和非金属之分,均可满足制动装置的需要,这里只介绍常用钢制制动片的热处理技术。制动片通常用 Q235 钢渗碳处理后淬火处理,也可用 65Mn 制作,均可满足工作需要。一般制动片硬度要求为 44~49HRC,碟形度为 0.25~0.55mm。汽车用制动凸轮采用 45 钢制造,对表面进行淬火处理,获得高的硬度和良好的耐磨性,而基体具有足够的强度和一定的韧性。

采用球墨铸铁制造制动蹄片,热处理后硬度为 45~58HRC。

3. 机械加工工艺流程

由于制动片较薄,热处理时容易发生翘曲,因此必须采取减少其变形的办法,一般为将摩擦片加热压平淬火,装入专用的回火工艺装备中回火,对渗碳摩擦片要严格控制渗碳的均匀性。摩擦片的工艺流程比较简单,渗碳类:冲料→渗碳→淬火→低温回火→磨加工→低温回火→防锈包装;而 65Mn 钢为:冲片→淬火→低温回火→磨加工→防锈包装。其中下料工序在压力机上进行,采用落料模冲裁即可。

4. 制动片和制动凸轮的热处理工艺规范

1) Q235 钢渗碳制动(摩擦)片。某种制动片厚度为 1.5mm,内孔直径和外径分别为 44mm 和 82mm。材料 Q235 钢经渗碳+淬火、回火的工艺。

① 920~930℃ × 2~2.5h 渗碳,随炉冷却,750℃ 出炉冷却,渗碳层深度为 0.4~0.5mm。

② 900~920℃ 盐浴炉加热 1min 后油冷。

③ 在 380~420℃ 硝盐炉回火 60~90min,磨加工后再进行一次回火,硬度为 40~45HRC,平面度误差 ≤ 0.10mm。

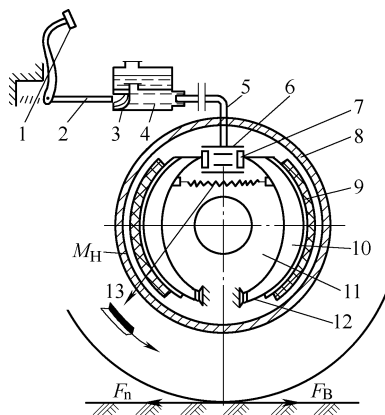


图 6-4 制动系统工作原理示意图

- 1—制动踏板 2—推杆 3—主缸活塞
4—制动主缸 5—油管 6—制动轮缸
7—轮缸活塞 8—制动鼓 9—摩擦片
10—制动蹄 11—制动底板
12—支承销 13—制动蹄回位弹簧

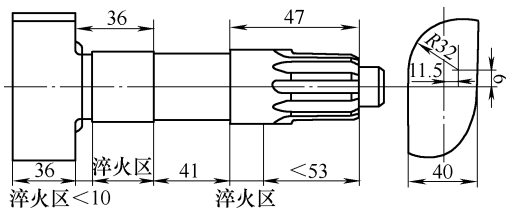


图 6-5 某种汽车的制动凸轮的结构形式

2) 65Mn 钢制动（摩擦）片。其厚度为 0.5mm，内孔直径和外径分别为 63mm 和 124mm。

① 盐浴加热至 820 ~ 840℃，保温 1.5 ~ 2min，淬入 20 ~ 80℃ 的油中冷却。

② 将制动（摩擦）片装入胎具在 340 ~ 360℃ 的硝酸盐中回火，保温 60min。

回火后的硬度为 44 ~ 48HRC，平面度误差 ≤ 0.10mm。

3) 制动凸轮的热处理。根据上述刹车凸轮的技术要求，其表面要求耐磨，因此要进行感应淬火处理，在实际生产过程中，又分为全表面淬火和凸轮局部淬火两种工艺方法。

① 制动凸轮的全表面淬火。从图 6-5 可知，该制动凸轮有三处需要进行感应淬火，即凸轮和两处轴径，凸轮所选用的材料为 45 钢，技术要求为淬火后表面硬度为 52 ~ 63HRC，凸轮部分全部表面淬火处理，其硬化层深度为 1.5 ~ 5.0mm，而轴径部分硬化层深度为 1.5 ~ 3.5mm，从而确保制动凸轮表面获得高的硬度和良好的耐磨性，满足其工作需要。

轴颈部分的淬火处理比较简单，采取连续淬火或同时淬火法可以达到其硬度和硬化层深度的要求。而凸轮的表面淬火因其形状特殊，故有一定的难度，在实际的淬火过程中采用两种淬火处理方法，一是圆环式感应淬火，另一种为仿形感应淬火，二者各有特点。

② 圆环式感应淬火技术。圆环式制动凸轮淬火感应器的形状如图 6-6 所示，该感应器的有效宽度比凸轮的宽度略大，以确保凸轮表面加热均匀一致。其工艺特点为淬火操作简单，但感应器与凸轮的间隙过大，淬火工艺参数调整比较困难，要使用较大功率的中频设备。该淬火方式的淬火工艺规范见表 6-1。

表 6-1 制动凸轮圆环式感应器中频淬火工艺规范

中频电源参数		中频淬火工艺规范							
频率/Hz	额定功率/kW	空载电压/V	负载电压/V	中频电流/A	功率因数	中频功率/kW	变压器匝数比	加热时间/s	冷却时间/s
8000	200	750	700	188	0.90	118	12:1	4.3 ~ 4.8	6.0 ~ 6.5

从表中可以看出，使用圆环式感应器对制动凸轮进行表面淬火处理时，由于间隙过大造成了输出功率仅为电源容量的 59%，零件的表面比功率小于 1.0kW/cm²，因此很难进行工艺参数的调整，工艺规范既不合理也不经济，目前已基本上不再使用该淬火方法。采用仿形表面淬火代替该工艺，避免了上述缺点。

③ 仿形感应器淬火技术。采用仿形感应淬火技术能够使凸轮表面得到高的硬度，在 8kHz、100kW 中频电源作用下实现仿形感应器淬火，其感应器的形状如图 6-7 所示，具体热处理工艺规范见表 6-2。

表 6-2 制动凸轮仿形感应器中频淬火工艺规范

中频电源参数		中频淬火工艺规范							
频率/Hz	额定功率/kW	空载电压/V	负载电压/V	中频电流/A	功率因数	中频功率/kW	变压器匝数比	加热时间/s	冷却时间/s
8000	100	375	380	270	0.85	82	5:1	8	7

仿形感应器淬火工艺中的输出功率达到了 82kW，明显提高了加热的效果。该方法具有可操作性，输出功率可以调整，因此该工艺规范比较经济合理。仿形感应器淬火通常在卧式淬火机床上进行，感应器可在机床上左右移动，可对左右凸轮进行表面淬火处理。

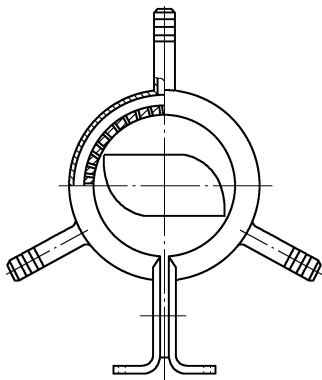


图 6-6 圆环式制动凸轮淬火感应器

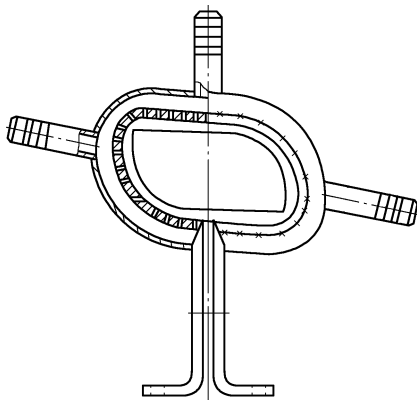


图 6-7 制动凸轮表面淬火用仿形感应器

4) 制动凸轮局部淬火。图 6-8 所示为某类 S 形制动凸轮。在制动过程中其要承受扭转力矩和很大的摩擦力作用，要求其轴颈和圆角进行中频感应淬火，而制动凸轮的两个凸面进行局部中频感应淬火处理。选用的材料为 45 钢，经过毛坯锻造，退火处理后再进行调质处理，最后中频感应淬火。技术要求为淬火区域硬度为 55~60HRC，凸轮和杆部的硬化层深度为 2~3.5mm，同时圆角的硬化层深度要不小于 0.5mm。

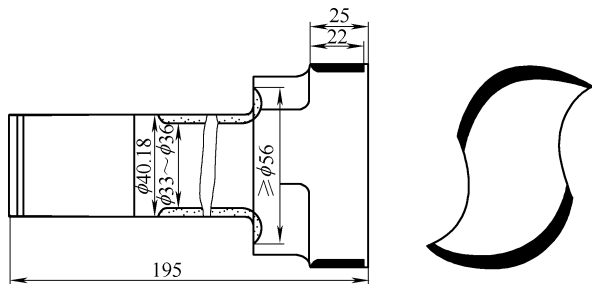


图 6-8 S 形制动凸轮及两凸面局部淬火硬化层的分布

感应器有效圈的结构如图 6-9 所示。考虑到凸轮的凹面不需进行淬火处理, 图 6-9 所示结构的设计比较合理, 与两凸面对应着两个水腔, 内部通有冷却水, 在凸面加热到奥氏体温度后, 对其进行喷射冷却淬火。而与凹面对应的水腔, 在凸面加热时对凹面进行喷水冷却, 避免由于涡流在加热凸面的同时加热凹面而造成温度的升高。另外, 为防止尖角出现过热, 在感应器相对应的位置要开出槽口。制动凸轮局部淬火工艺规范见表 6-3。

表 6-3 制动凸轮局部淬火工艺规范

中频电压/V	中频电流/A	中频功率/kW	功率因数	变压器匝数比 N	加热时间/s	冷却时间/s
550	120	50	0.95	10:1	6.5	5.0

凸轮淬火的热处理效果非常好, 两凸面硬化层完全进行仿形, 硬化层深度为 2.2 ~ 2.5 mm, 而两凹面没有进行淬火处理。事实证明, 制动凸轮采用这种表面淬火技术质量稳定, 生产率高, 目前正得到推广和应用。

某种汽车后制动蹄片轴如图 6-10 所示。它的材质为 45 钢, 技术要求: 心部为正火组织, 表面硬度为 55 ~ 63 HRC, 硬化层深度为 1.2 ~ 2.7 mm。因此, 需要进行同时中频感应淬火以满足其工作需要, 淬火后的回火温度为 240 ~ 260 °C。

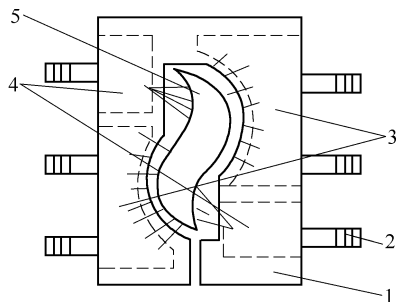


图 6-9 双凸面制动凸轮局部淬火感应器有效圈示意图

- 1—有效圈 2—进水管 3—双凸面淬火水腔
4—双凹面冷却水腔 5—S 形制动凸轮

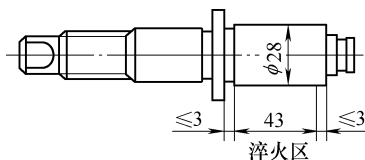


图 6-10 汽车后制动蹄片轴

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 两种不同材质的摩擦片经过上述热处理后获得回火托氏体组织, 均达到了硬度和变形的要求, 其综合强度较高, 满足了工作需要。

2) 上述 65Mn 摩擦片采用的是改进后的工艺, 原来用斜铁挤紧夹具, 将制动(摩擦)片压紧后回火, 这种方法变形大, 合格率较低。由此可见, 良好的回火工艺装备是保证变形合格的重要条件。

3) 在进行制动凸轮全表面淬火和凸轮局部淬火时, 要注意加热部位与热影响区, 必要时应加以保护, 同时要确保冷却均匀, 避免软点与软带等缺陷的出现。另外, 要有保护电击伤的措施, 否则会产生废品。

4) 表面淬火后要及时进行回火处理, 防止淬火应力过大而造成零件的开裂。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第2卷 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 徐维新, 林鹤雄, 郭平尔. 现代汽车新技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.
- [3] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [4] 沈庆通, 梁文林. 现代感应热处理技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

第 7 章

其他零件的热处理



7.1 概述

7.1.1 轴承的作用与要求

轴承是一个支撑轴的零件，它可以引导轴的旋转，也可以承受轴上空转的零件，轴承可分为滚动轴承和滑动轴承等，一般所说的轴承指的是滚动轴承。支撑其实质就是能够承受径向载荷，就是固定轴使其只能转动，而控制其轴向和径向的移动。

汽车轴承主要有两个作用：保证车辆转向时减振器能随车轮一起转动，使之保持转向的灵活性；压力轴承的外圈为橡胶制品，可保持车身与减振器之间的软性连接，防止汽车行驶时由于路面不平将振动通过减振器传到车身。

汽车在行驶过程中，因路况等原因轴承经常出现开裂损坏现象，以致在颠簸的路面行驶时前部会发出“咣当”的响声，严重时会使车轮定位失准。

目前在汽车制造过程中，应用数量较多的基础部件为轴承、紧固件等，它们是必不可少的，其质量的高低直接影响到使用性能，事实证明该类零件的选材、加工与正确的热处理是相互关联的，了解与掌握这些过程是制造产品的前提与基础，并可对缺陷进行预防与改进，可有效提高轴承与紧固件的产品质量。

轴承用钢包括高碳铬轴承钢、渗碳钢、碳素钢、不锈钢以及耐热钢等，轴承的钢球（或滚柱）在内、外圈轨道上回转，伴有少量滑动接触，由外加载荷产生较高的反复应力载荷，除机械应力外，同时还有使用环境造成的热应力及化学作用影响，因此为了延长轴承的使用寿命，不出现疲劳破损、磨损、烧伤、腐蚀及噪声等，必须保持轴承的精度。为了满足上述轴承的性能要求，应保证轴承具有表 7-1 所列的性能与材料特性，其中最重要的是高硬度，动态、静态的强度以及保持良好

的韧性的组织，并必须减少易引起剥落的内部缺陷。另外要防止长时间在各种应力下使用时引起的组织变化和尺寸变化，以及应确保良好的塑性加工性能及切削加工性。

表 7-1 轴承的性能与材料特性

要求的性能	条 件 特 性	材料具备的特点
耐高负荷	大的变形抗力	高硬度
能高速旋转	摩擦、磨耗少	耐磨性好
旋转性能好	旋转精度高	组织稳定
具有互换性	尺寸精度高、尺寸稳定性好	
可长期使用	耐久性好	疲劳强度大

目前对轴承的使用条件又提出了很多要求，如耐腐蚀、耐低温、耐高温等，同时要求降低成本、提高加工性能。其中高碳铬轴承钢的热处理工艺包括以均热扩散处理消除大块共晶碳化物，减少树枝状偏析；以正火处理消除网状碳化物，生成细片状的碳化物组织即索氏体；进行球化退火，使球状碳化物均匀细小地分布于铁素体上；进行淬火与回火处理，以获得要求的硬度与耐磨性等，文献指出，轴承在载荷下工作时，接触面产生的弹性接触压力最大可达 300 ~ 400MPa，承受如此高的接触压力，必须有平均接触压力 3 倍以上的硬度，经计算硬度应为 62HRC（750HV）左右。

轴承的热处理包括正火、球化退火、淬火和低温回火、冷处理等，其中正火并不是生产中必不可少的工序，需要进行正火处理的情况包括：因锻造毛坯不当使毛坯组织中出现粗大网状碳化物时，退火前进行正火处理；退火不当引起组织过热不合格，退火前进行正火处理；要求耐回火性好的（即回火后硬度下降少），退火前进行正火处理。轴承钢正火过程中的组织转变情况见表 7-2，通常在正常工艺参数下依靠工艺来保证正火质量，如有必要检查，则检查有无裂纹、组织不良等。

表 7-2 轴承钢正火过程中的组织转变情况

正火前的原始组织	正火加热温度下的组织	略大于空气冷却速度冷却后的正火组织
锻造不良（粗大网状碳化物）	单一奥氏体	细片状珠光体 + 索氏体
退火过热（颗粒不均匀的碳化物及片状珠光体）		
正常锻造（珠光体及索氏体）		

轴承退火的目的是使钢内部组织变为球状珠光体，降低硬度和便于车削加工等，其退火工艺包括球化退火、低温退火、等温退火、快速退火等，视具体情况进行选择。

轴承的淬火与回火是制造过程中的重点工序，淬火后可获得一定含碳量的细小马氏体 + 一定量碳化物 + 少量残留奥氏体组织，以获得高硬度、高强度、高耐磨性和高的接触疲劳强度，通过低温回火得到具有一定弹性、韧性以及尺寸稳定性等良好的综合力学性能。

轴承的冷处理通常用于尺寸稳定性要求高的精密轴承，其可以减少组织中的残留奥氏体，使组织稳定，提高轴承的尺寸稳定性，同时硬度也稍有提高。一般而言，对于超精密以及经分级淬火的轴承钢套圈才进行冷处理。

7.1.2 紧固件等零件成型的方法与特点

据统计约有 70% 的被连接件和组合装置是由紧固件连接的，平均每辆轿车的紧固件约有 1500 个，关键部件如缸盖螺栓、连杆螺栓、轮胎螺栓等对整车质量具有重要影响。紧固件包括螺栓、螺钉与螺母等，其中高强度螺栓通常采用中碳钢或中碳合金钢进行调质处理，也有采用非调质钢、硼钢、F-M 双相钢或低碳马氏体钢制造的。

众所周知，汽车零件大多采用钢铁制造，而汽车锻件又在整车中占有一定的比例，国内外常用的锻钢有碳素钢、硼钢、锰钢、铬钢和铬锰钢等，其锻造方法有热锻和冷锻两种。热锻在重柴油或煤加热炉中加热，也可感应加热，需要控制锻件表面的脱碳、过热与坯料的尺寸精度等。而冷锻具有生产率高、材料利用率高、表面质量好、寿命长、易于实现自动化操作、明显改善劳动环境、冷加工硬化提高了零件的抗拉强度等特点。其缺点为形状复杂的不能成形，冷锻工艺使零件内部发生缺陷，有一部分材料不易进行冷锻成形。冷锻分为正挤压、反挤压和墩锻等几种，它们是制造汽车零件的常用方法。

汽车零件的制造方法很多，通常采用热挤压、锻造、车削和磨削、冷挤压、冷锻等工艺方法，其中冷锻为汽车零件制造过程中比较成熟的技术，广泛应用于汽车的零部件制造工艺中，汽车上部分冷锻成形汽车零部件的材料应用情况见表 7-3。

表 7-3 部分冷锻成形汽车零部件的材料应用情况

钢 号	主 要 用 途
10、15、20、25	火花塞罩、压力开关壳、轴环、球节罩壳、扭力杆固定器、气门挺杆及柱塞、活塞销、气门弹簧座、门锁齿轮、摇臂支持衬套、各种螺钉（栓）、各种衬套、销钉类零件等
20Cr、20CrMnTi	活塞销、轴类件、轴承环、球头销、齿轮用衬套、销钉零件、花键轴等
30、35、40、45	半轴、球头销、发电机轴、减振器轴、传动轴、各种螺钉
40Cr、45Cr、42CrMo	球头销、各种螺钉等

螺栓的制造方法分为三种：冷成形、热成形和切削加工，广泛采用冷成形或热

成形。冷成形的优点为：尺寸精度准确，表面质量高；能使金属强化，如冷滚压出的疲劳强度高；与热处理工艺结合能保证其力学性能与物理化学性能稳定；生产率、经济性高，因此冷成形方法得到了广泛的推广与应用。

常见典型钢种成形推荐的冷镦成形压力参见表 7-4，需要说明的是冷镦材料在成形前应进行适当的预备热处理，以提高零件的成形质量。一般企业多采用软化退火、球化退火、磷酸锌膜处理等，事实证明预备热处理对零件的使用寿命和性能等有很大的影响。

表 7-4 常见典型钢种推荐的冷镦成形压力

成形方法	碳素钢 [$w(\text{C}) \leq 0.1\%$]		碳素钢与渗碳钢 [$w(\text{C}) \leq 0.30\%$]		碳素钢 [$w(\text{C}) \leq 0.50\%$]	
	端面收缩率 (%)	压力/MPa	端面收缩率 (%)	压力/MPa	端面收缩率 (%)	压力/MPa
正挤压	50 ~ 80	140 ~ 200	50 ~ 70	160 ~ 250	40 ~ 60	200 ~ 250
缩颈	25 ~ 30	90 ~ 110	24 ~ 28	100 ~ 130	23 ~ 28	115 ~ 150
反挤压	40 ~ 70	160 ~ 220	40 ~ 70	180 ~ 250	30 ~ 60	200 ~ 250
自由锻造	50 ~ 60	52 ~ 70	50 ~ 60	80 ~ 100	50 ~ 60	100 ~ 150
模锻	30 ~ 60	100 ~ 160	30 ~ 50	160 ~ 200	30 ~ 50	180 ~ 250
压印	—	200 ~ 250	—	200 ~ 260	—	200 ~ 250

7.2 轴承的热处理

1. 工作条件和技术要求

轴承广泛用于柴油机、拖拉机、机床和汽车等各种机械与运输设备上，它由轴承内套、外套、滚动体（钢球、滚柱和滚针）和保持器（架）四部分组成。内套紧装于主轴上，随轴一起转动。而外套则装在轴承座中静止不动，在轴转动过程中，内套和滚动体发生转动和滚动，在高速运动下服役，承受点或线接触的周期性高压交变载荷和应力的作用，故容易产生局部应力集中，造成零件的早期失效。

滚动体和内、外套三者之间既呈现滚动又呈现滑动，故会产生滚动摩擦和滑动摩擦，接触面反复承受应力载荷，因此滚动轴承的损坏形式为接触疲劳破坏和磨损，要求滚动体与内、外套具有高的抗疲劳性能和耐磨性，有良好的尺寸稳定性，这样才能确保轴承高的使用寿命。连杆、凸轮轴、曲轴等需要的轴瓦是分成两半的，轴瓦一般是在厚 1 ~ 3mm 的低碳钢钢背的内圆面上浇注 0.3 ~ 0.7mm 减摩合金层（巴氏合金、铜铝合金或高锡铝合金等）而成的。

2. 材料的选用

根据轴承的工作特点，要求制造轴承的材料必须具有以下性能：高的硬度和耐

磨性；高的疲劳强度和合理的韧性；具有一定的耐蚀性；良好的尺寸稳定性，使用寿命长，能保证精度和具有良好的机械加工和热处理性能。

除机械行业所用轴承具有的特性外，其他行业对轴承又增添了耐蚀性、耐高温性、抗辐射和防磁特性等要求。

(1) 高铬轴承钢 GCr15、GCr15SiMn 钢中的碳质量分数为 0.95% ~ 1.05%，铬元素的质量分数为 0.5% ~ 1.6%，确保了高硬度的要求。铬元素的加入明显提高了钢的淬透性，同时也细化了晶粒，淬火后隐晶马氏体基体上有细小的均匀分布的碳化物存在，不会出现纤维状碳化物的分布，铬还提高了低温回火的耐回火性。这两种材料适宜制作轴承，通常二者用于制造轴承的内、外套圈和滚动体，用低碳钢板冲制保持器。另外 GCr18Mo、GCr15SiMo 等均可制造套圈、滚动体等，各项技术指标完全符合要求。

(2) 渗碳轴承钢 如 08、10、15Mn、15Cr、20Cr、G20CrMoA、G20CrNiMoA、G20Cr2Ni4A 等，经过渗碳或碳氮共渗处理后可分别制作轴承内套、外套和保持架等，应用十分广泛。

(3) 轴承合金 它主要用于制造轴瓦和内衬，滑动轴承在工作过程中的截面积较大，要求运转十分平稳，制造和维修方便，多用于机床、汽车和拖拉机。

轴承由轴承体和轴瓦组成，轴瓦与轴颈直接接触，转动过程中，支承轴与工作轴之间会产生剧烈的摩擦。考虑到轴为十分重要的零件，其成本较高、制造和更换困难等，为确保轴的磨损量最小，必须及时更换轴瓦，最常见的是内燃机主轴瓦和连杆轴瓦。

1) 轴承合金应满足以下要求：低的摩擦因数，可储存油，减少磨损；硬度适中，有良好的磨合性，轴瓦本身有一定的耐磨性；足够的抗压强度和疲劳强度，可承受较大周期性载荷的作用；可抵抗冲击和减少振动，要有足够的塑性和韧性；具有良好的导热性，热量散失快，不会发生咬合现象；具有良好的耐蚀性，可抵抗润滑油的侵蚀；具有良好的铸造性，流动性好。

2) 一般轴承合金的组织特征一是在软基体上均匀分布着硬质点。一般材料钢背用 08Al、08、10、15 等低碳钢，硬度为 160 ~ 220HBW。轴承合金有巴氏合金如 ZSnSb4Cu4、ZSnSb8Cu4、ZSnSb11Cu6，硬度为 12 ~ 30HRC；锡基合金如 ZPbSb10Sn6、ZPbSn15Sn5；铜基合金如 ZCuPb30 (30 ~ 36HBW)；铝基合金如 ZAlSn6Cu1Ni1 (22 ~ 32HB) 等，要求合金层表面不得有夹杂物、气孔和疏松，合金层与钢背面牢固粘合，不允许脱落。

在工作过程中软基体磨损快，其凹坑有润滑油存在，因此可保证有良好的润滑条件和低的摩擦因数，减少了轴颈的磨损。而硬质点凸出表面以支撑轴颈，故有良好的耐磨性和承载能力，其特点为良好的磨合性、抵抗冲击和振动，但承载能力差。

组织特征二是在硬基体上均匀分布着软质点，可承载较高的载荷和转速，但磨合性差，材料多为铜基合金、铅基合金和铸铁等。

3) 常用的轴承合金的基本表示方法为：Z + 基体元素符号 + 主要合金元素以及各主要元素的质量分数，通常分为锡基轴承合金、铅基轴承合金、铜基轴承合金和铝基轴承合金四类。

① 锡基轴承合金是指以锡为基础加入锑、铜等元素的合金，该类合金具有良好的减摩性、塑性和韧性以及优良的导热性和耐蚀性等，其缺点为疲劳寿命低和价格高等，一般用于发动机、汽轮机、压缩机等的高速轴承上。

② 铅基轴承合金（也称为铅基巴氏合金）是以铅、锑为主又加入锡、铜等元素的合金，其强度、硬度、韧性比锡基低，而且摩擦因数大、价格低，多用于制造中等载荷的中速轴承，如汽车、拖拉机、曲轴等的轴承以及电动机轴承。常用锡基和铅基轴承合金的牌号、性能及用途见表7-5。

表 7-5 常用锡基和铅基轴承合金的牌号、性能及用途

类 别	牌 号	加工方法	硬度 (HBW)	用 途
锡基轴承合金	ZSnSb8Cu4	金属铸造	24	大型机器轴承，汽车发动机、蒸汽机、涡轮机、内燃机等轴承
	ZSnSb11Cu6		27	
铅基轴承合金	ZPbSb15Sn5		20	低速、轻压力机械轴承
	ZPbSb16Sn16Cu2		30	在120℃工作的无明显冲击载荷的低速轴承，如汽轮机、曲轴电动机和起动机等轴承

这两种合金的强度低，不能承受很大的压力。

③ 铜基轴承合金是指铅青铜合金，如 ZCuPb30 等，显微组织为硬质体（Cu）和软质点（Pb）颗粒，具有高的疲劳强度和承载能力，高的导热性和低的摩擦因数，多用于高速重载工作下的轴承，如航空发动机、高速柴油机以及其他主轴承。

④ 铝基轴承合金是以铝为基础加入锡、锑和铜等组成的合金。具有减摩性好、导热性好、疲劳强度和硬度高、耐蚀性强等特点。常见有铝锑镁合金和铝锡合金等，其缺点为线膨胀系数大、抗咬合性差。

⑤ 珠光体型灰铸铁是制作滑动轴承的材料，其显微组织为硬质点（P）+ 软质点（C），石墨具有润滑作用。用于制作承受较大压力的轴承，考虑到其摩擦因数大、导热性差，故只用于低速、非重要的轴承。

主轴承以上下分开的轴瓦形式将曲轴夹住并支承曲轴，轴瓦通过轴承盖固定在发动机的机体上，润滑油衬垫起着保护轴瓦和曲轴轴颈的作用，轴瓦的内表面必须光滑，才能顺利形成油膜，因此曲轴轴颈的表面有高的硬度和低的表面粗糙度。主轴承的形式如图7-1所示。

3. 轴承的制造和预备热处理

从轴承的工作环境和承受载荷的特点分析, 轴承的四部分具有各自的作用, 其各部分的材料和技术要求也有很大的差别, 因此机械加工的流程不尽相同, 下面分别加以介绍。

(1) 轴承的加工工艺流程 根据部件的不同, 其工艺流程存在差异, 这里以套圈与滚动体为例, 讲解工艺流程。

1) 套圈的加工路线: 热轧未退火棒料→锻压毛坯 (渗碳钢如图 7-2 所示)→正火→球化退火→车削加工→热处理→粗磨→细磨→精研工作表面→成品。热轧退火棒料则直接进行车削加工。

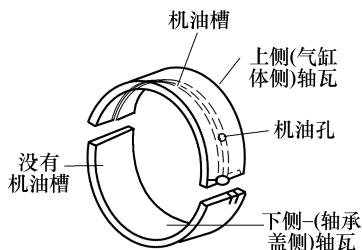


图 7-1 主轴承的形式

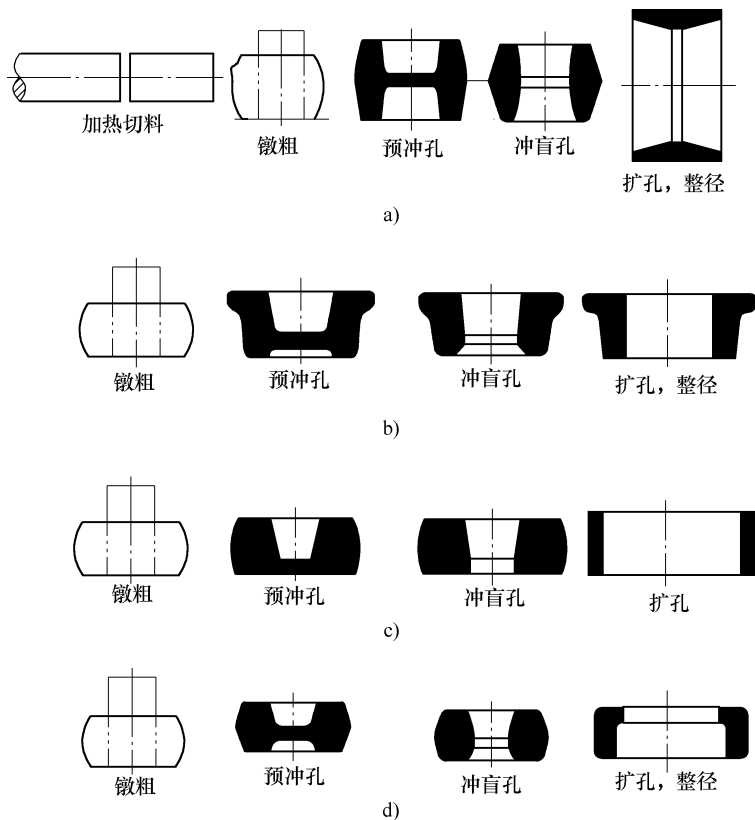


图 7-2 渗碳钢轴承套圈的锻造成形示意图

a) 外圈 b) 内圈 c) 中隔圈 d) 密封座

根据具体的加工工艺也可执行下面的工艺路线：备料→锻造→球化退火→机械加工→热处理→冰冷处理→低温回火→磨削加工→成品。

2) 滚动体的加工路线。

冷冲及热冲钢球：钢丝或冷拉条钢→冷冲或半热冲→光球加工→热处理→粗磨→强化处理→精磨→精研→成品。

热冲及模锻钢球：未退火条钢→热冲或下料→热锻→球化退火→光球加工（锉削-软磨）→热处理→粗磨→强化处理→精磨→精研→成品。

滚珠或滚针：冷拉钢或条钢→冷冲、冷轧或车削→热处理→粗磨→精磨→成品。

少数滚动体生产厂家采用备料→热轧热压（或车削、冷锻）→球化退火（或再结晶退火）→机械加工→热处理→机械加工→喷砂→抛光的工艺路线，实践证明效果不错。

(2) 轴承零件的预备热处理 该热处理包括球化退火、去应力退火等，获得的组织对轴承的最终热处理有一定的影响。

1) 球化退火为预备热处理，锻造后的组织为片状珠光体，硬度为 255 ~ 340HBW，难于进行机械加工，球化退火后组织变为均匀分布的细粒状珠光体，既降低了硬度，又具有良好的机械加工性，同时为最终的热处理做好组织准备。试验表明原始珠光体为球状时，才能具有高的强度和良好的韧性，淬火后可获得高的基体硬度和疲劳强度，耐磨性得到提高，明显提高了使用寿命，球化退火又分为普通球化退火、等温球化退火和快速球化退火等，可根据零件的尺寸、结构和技术要求等合理选择，退火通常在箱式炉、井式炉或台车式炉中进行，对于大批量产品则推荐在推杆炉或大型专用退火炉中完成退火工序。资料介绍，球状珠光体有三大优点：加热的温度范围宽，淬火变形和开裂几率减少，残留奥氏体的量减少。要求退火后的硬度为 197 ~ 241HBW，球化级别为 1 ~ 3 级，表面的脱碳层厚度应小于加工量的 2/3。

2) 轴承零件的去应力退火工艺为 $550 \sim 650^{\circ}\text{C} \times 3 \sim 5\text{h}$ 炉冷；而再结晶退火用于消除冷轧、冷拔和冷冲后在零件中产生的冷作硬化，得到正常的晶粒。对于 GCr15 钢工艺为 $670 \sim 720^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 8\text{h}$ ，而 GCr15SiMn 钢的工艺为 $650 \sim 670^{\circ}\text{C} \times 2 \sim 8\text{h}$ 。

(3) 套圈的退火工艺 套圈的退火工艺有两种（图 7-3），一种为一般球化退火，通常因其退火时间长，影响生产率而较少采用；另一类是普通的等温球化退火，具有时间短、球化效果好的特点，套圈通常采用该类退火工艺。

(4) 滚动体的退火规范 对于热轧、热压成形的滚动体，组织为细片状的珠光体，应注意其加工余量小，锻造后应密封进行退火，以防氧化或脱碳，一般温度比套筒的加热温度低，多为 $780 \sim 790^{\circ}\text{C}$ 。对于低温热轧、热压或冷锻成形的滚动

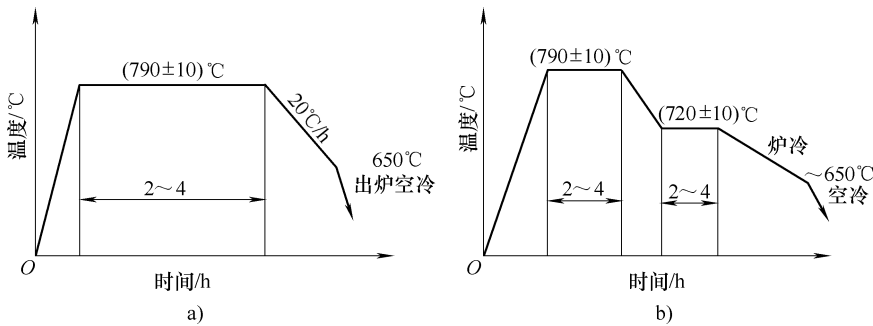


图 7-3 GCr15 钢球化退火工艺规范
a) 一般球化退火工艺 b) 等温球化退火工艺

体，只进行再结晶退火，温度为 680 ~ 700℃，保温 4 ~ 6h，来消除加工硬化和去除应力，以利于机械加工。

(5) 轴承钢常见退火缺陷和措施（表 7-6）。

表 7-6 轴承钢常见退火缺陷和措施

检查项目	技术要求	缺陷名称		产生原因	补救方法	补救措施
脱碳层	厚度小于车削加工量的 2/3	脱碳层超标		① 锻造后正火脱碳严重 ② 退火设备密封性差或未在保护气氛中加热 ③ 退火温度高或保温时间长 ④ 进行两次以上的退火	① 改为尺寸小的零件或报废 ② 对工件进行密封退火或在可控气氛炉内退火 ③ 正确执行工艺 ④ 避免二次退火	① 加强对脱碳层的控制 ② 防止炉温失控 ③ 重要零件需重新退火
显微组织	① 退火组织为均匀分布的球状珠光体，级别为 2 ~ 4 级 ② 碳化物级别 ≤ 2.5 级	加热欠充分（欠热）	点状 P + 部分细片状 P	① 加热温度低或保温时间短 ② 原材料组织不均匀 ③ 装炉量过多，炉内温差大 ④ 局部加热不足或保温时间短 ⑤ 加热温度高，冷却太快	① 制订合理的退火工艺并严格执行 ② 严格进行原材料的检查 ③ 装炉量应合理，放置位置适当 ④ 将零件放置在有效加热区内 ⑤ 执行工艺，控制冷却速度	根据工艺要求，可安排二次退火

(续)

检查项目	技术要求	缺陷名称		产生原因	补救方法	补救措施
显微组织	① 退火组织为均匀分布的球状珠光体, 级别为 2 ~ 4 级 ② 碳化物级别 ≤ 2.5 级	过热	颗粒大小不一, 分布不均匀, 粒状 P + 粗片状 P	① 加热温度高或保温时间长 ② 原材料组织不均匀 ③ 装炉量过多, 位置不当, 炉内温差大、均匀性差 ④ 局部加热温度高或保温时间长	① 制订合理的退火工艺并严格执行 ② 严格进行原材料的检查 ③ 装炉量应合理, 放置位置适当 ④ 将零件放置在有效加热区内	先正火后调整工艺, 进行快速退火或进行正常退火
		粗大碳化物颗粒		① 锻造组织中有大片状 P ② 退火温度高, 速度慢 ③ 原材料碳化物出现网状或带状 ④ 反复退火	① 控制锻造温度 ② 执行工艺要求 ③ 选择合格的原材料 ④ 尽可能不进行重复退火	先正火后进行一次退火
		网状碳化物不合格		① 锻造组织有严重的碳化物网, 退火无法消除 ② 退火温度高或冷却速度低	① 控制锻造质量和加热的温度 ② 严防失控超温和冷却速度低	先正火后进行第一次退火
硬度	GCr15: 170 ~ 207HBW、GCr18Mo、GCr15SiMo、GCr15-SiMn: 179 ~ 217HBW	硬度高	组织不合格	① 加热不均匀, 有片状 P ② 冷却速度太快, 产生密集点状 P	① 均匀加热 ② 控制冷却速度	调整工艺进行二次退火
		硬度低		① 组织过热 ② 多次退火或冷却速度慢	① 均匀加热 ② 控制冷却速度	先正火后进行退火

(6) 轴承零件的正火处理 为了消除和改善轴承钢中的网状碳化物, 细化和均匀化组织, 改善退火组织中的粗大碳化物, 应对其进行正火处理。具体工艺的制订应依据锻件的具体情况和技术要求进行, 正火工艺的关键在于选择加热温度与冷却方法, 冷却速度与冷却方法十分重要, 如选择不当, 不但不能消除网状碳化物、改善组织, 反而会再次出现网状碳化物或其他缺陷。铬轴承钢锻件的正火工艺规范见表 7-7。

表 7-7 铬轴承钢锻件的正火工艺规范

正火的目的 和特征	材料牌号	正火工艺规范		
		加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却方法
消除或减少粗大的 网状碳化物	GCr15	930 ~ 950	40 ~ 60	正火后的冷却方法要本着避免析出网 状碳化物或碳化物颗粒，无裂纹等缺陷 的原则进行选择，速度应 $\geq 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 冷却方法归类如下： ① 空冷 ② 强制风冷 ③ 喷雾冷却 ④ 在 70 ~ 80℃ 的水中冷至 300 ~ 400℃ 空冷 ⑤ 在 70 ~ 80℃ 的乳化液中冷至 300 ~ 400℃ 空冷 上述工艺方法的选取取决于零件的 有效厚度和正火温度
	GCr15SiMn	890 ~ 920		
消除较粗大的网 状碳化物，改善锻 后晶粒度，消除片 状 P 组织	GCr15	900 ~ 920		
	GCr15SiMn	870 ~ 890		
细化组织，确保同 一批零件退火组织的 均匀性	GCr15	860 ~ 890		
	GCr15SiMn	840 ~ 860		
改善退火后组织中 粗大的碳化物颗粒	GCr15	950 ~ 980		
	GCr15SiMn	940 ~ 960		

(7) 铬轴承钢锻件常见正火缺陷和措施（表 7-8）

表 7-8 铬轴承钢锻件常见正火缺陷和措施

缺 陷 特 征	产生的原因	应采取的措施或方法
碳化物网状组织 级别超差	① 原材料本身碳化物网状组织级别 超过标准要求 ② 正火温度偏低或保温时间短 ③ 正火后冷却方法选择不当，冷却 速度慢	① 确保使用合格的材料 ② 正火时执行工艺规范 ③ 选择合理的冷却方法，加快冷却速度
严重脱碳，超过 加工余量	① 锻件本身脱碳超差 ② 位在保护性气氛中加热，表面 氧化 ③ 正火时装炉量多，保温时间长	① 严格执行返工工艺，温度和时间符合 要求 ② 采用保护气氛或调整火焰为中性 ③ 正火时合理选择正火温度和保温时间
裂纹	① 锻件停锻温度低于要求的温度或 原材料有裂纹 ② 正火后冷却太快或冷却介质温度 过低	① 加强对原材料和正火后材料的质量 检验 ② 严格执行正火工艺，在冷却介质水或 乳化液中冷至 300 ~ 400℃ 提出空冷，及时 退火

(8) 轴承钢的双细化处理 有资料介绍了轴承钢的碳化物细化和晶粒细化，即所谓双细化处理工艺。其具有三个优点：比原始组织晶粒细化 1.5 ~ 2.0 级，碳化物尺寸小于 0.6 μm ；提高钢的冲击韧度、抗弯强度和疲劳寿命，碳化物的均匀

性得到提高；热处理后获得均匀的马氏体组织，提高了整体的硬化均匀性。主要工艺为：锻造余热淬火后进行高温回火或等温快速退火，前一种获得均匀分布的点状 P + 细粒状 P，硬度为 207 ~ 220HBW，后一种获得均匀分布的细小粒状 P + 点状 P，硬度为 187 ~ 207HBW；亚温锻造后快速退火是一种细化晶粒的工艺，用于大批量生产；毛坯温挤后高温回火或快速退火。

4. 轴承的最终热处理

在制造轴承零件时，铬轴承钢为主要的钢种，GCr15、GCr15SiMn 等是最具有代表性的牌号，它们用于制造套圈、滚动体等，与 GCr15 相比 GCr15SiMn 具有更好的淬透性。轴承钢的热处理工序为淬火→冷处理→回火→稳定化处理（补充回火）等几步。

要求轴承的套圈在热处理后变形小，只允许出现轻微的脱碳，因此在大批量生产时，要采用自动化程度较高的热处理操作系统。轴承的热处理主要是淬火 + 低温回火处理（或称为消除应力的回火），获得回火马氏体 + 细小的碳化物颗粒 + 极少量的残留奥氏体。使零件具有高硬度和耐磨性，高的强度和韧性。

（1）套圈和滚动体的普通淬火和回火 热处理加热设备有许多类，如连续式网带炉、振底炉和推杆炉等，采用的保护气氛为单组分气体如氮气等，劳动效率高，其基本程序为上料→清洗→烘干→加热→冷却→清洗→回火等，零件通过升降机进入加热炉和回火炉。也可采用周期性的箱式炉、盐浴炉和中频感应加热炉等。这里以盐浴炉与连续式网带炉为例编制热处理工艺，轴承钢经过加热淬火后获得了高的硬度和耐磨性，具备高的接触疲劳强度和可靠性以及高的尺寸稳定性等。淬火回火时产生的残留奥氏体及残留应力可成为轴承时效变形的起因，故必须使其稳定化，而残留应力在表面形成压应力时，对于抑制滚动疲劳裂纹的传播是有利的。

轴承钢热处理后的组织为马氏体 + 残留奥氏体 + 碳化物等，其中马氏体的化学成分一般是 $w(\text{C}) = 0.5\%$ 、 $w(\text{Cr}) = 1.0\%$ 、 $w(\text{Mn}) = 0.4\%$ ，残留碳化物数量取决于其组成，并且碳化物可防止晶粒的粗大化，残留碳化物量少时马氏体的含碳量过高，淬火敏感性增大，晶粒粗大化，韧性下降的同时，滚动接触疲劳寿命也缩短。残留碳化物量因淬火温度、保温时间不同而变化，故淬火处理对强度和疲劳寿命有极大的影响。图 7-4 所示为 GCr15 轴承钢淬火温度与硬度、残留奥氏体量、残留碳化物量和晶粒度的关系，综合考虑，GCr15 轴承钢的淬火温度在 840 ~ 860℃ 是最佳的。

轴承钢的回火是在 200℃ 以下进行的，通常选择低温度、长时间的回火工艺，使残留奥氏体分解转变为马氏体等，具体应根据轴承的尺寸、装炉量、回火介质等综合考虑，回火后组织为马氏体及碳化物和残留奥氏体的混合组织，其中有 7%（体积分数）左右的碳化物，10%（体积分数）左右的残留奥氏体，其余 80% 左右为马氏体组织。

1) 预热是将零件烘干，防止盐浴发生飞溅，同时可部分减少变形，预热可缩短保温时间，一般预热时间为加热时间的 2 ~ 3 倍。

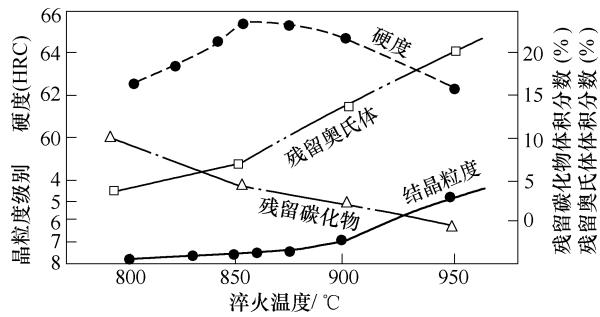


图 7-4 GCr15 轴承钢淬火温度与硬度、残留奥氏体量、残留碳化物量和晶粒度的关系

2) 加热在 NaCl 和 KCl 质量分数均为 50% 的盐浴中进行, 加热温度要能确保在该温度下钢中的奥氏体含有过量的碳, 并能溶解锰、钼和铬等大量合金元素使它们分布于晶粒内, 不允许有晶粒粗大现象和过热组织。加热时间为升温、均温和保温时间的总和, 它与加热温度密切相关, 二者成反比关系。对于不同的热处理工艺, 温度、炉型、加热介质有较大的差别, 其基本选取标准为固溶体中的碳质量分数为 0.5% ~ 0.6%、铬质量分数为 1%、未溶解的碳化物占 6% ~ 9% (体积分数) 时的加热温度为最佳。

采用网带炉处理轴承钢的热处理工艺参数见表 7-9。

表 7-9 采用网带炉处理轴承钢的热处理工艺参数

材 料	产 品 名 称	有效厚度 /mm	加热温度 /℃	加热时间 /min	回火温度 /℃	回火时间 /h	备 注			
GCr15	套圈	≤3	835 ~ 845	23 ~ 35	150 ~ 180	2.5 ~ 4	① 左侧数据为网带加热后油冷、回火空冷的工艺参数 ② 在盐浴炉中应吊挂成串淬火，钢球或滚珠使用专用工艺装备 a. 如采用盐浴快速加热，则应比正常温度高30 ~ 50℃ b. 需重新加热淬火时炉温应降低10 ~ 20℃ c. 对于大规格的钢球，如采用水冷，则加热温度应降低10 ~ 15℃ d. 盐浴炉必须进行脱氧处理			
		>3 ~ 6	840 ~ 850	35 ~ 45						
		>6 ~ 9	845 ~ 855	45 ~ 55						
		>9 ~ 12	850 ~ 860	55 ~ 60						
GCr15SiMn		>12 ~ 15	820 ~ 830	50 ~ 55						
		>15 ~ 20	825 ~ 835	55 ~ 60						
		>20 ~ 30	830 ~ 840	60 ~ 65						
		>30 ~ 50	835 ~ 845	65 ~ 75						
GCr15	钢球	≤3	840 ~ 845	23 ~ 35	150 ~ 180	2.5 ~ 4	① 左侧数据为网带加热后油冷、回火空冷的工艺参数 ② 在盐浴炉中应吊挂成串淬火，钢球或滚珠使用专用工艺装备 a. 如采用盐浴快速加热，则应比正常温度高30 ~ 50℃ b. 需重新加热淬火时炉温应降低10 ~ 20℃ c. 对于大规格的钢球，如采用水冷，则加热温度应降低10 ~ 15℃ d. 盐浴炉必须进行脱氧处理			
		>3 ~ 15	845 ~ 850	35 ~ 45						
		>15 ~ 50	850 ~ 860	50 ~ 65						
GCr15	滚珠、滚针	≤3	835 ~ 845	23 ~ 25				150 ~ 180	2.5 ~ 4	① 左侧数据为网带加热后油冷、回火空冷的工艺参数 ② 在盐浴炉中应吊挂成串淬火，钢球或滚珠使用专用工艺装备 a. 如采用盐浴快速加热，则应比正常温度高30 ~ 50℃ b. 需重新加热淬火时炉温应降低10 ~ 20℃ c. 对于大规格的钢球，如采用水冷，则加热温度应降低10 ~ 15℃ d. 盐浴炉必须进行脱氧处理
		>3 ~ 10	840 ~ 850	35 ~ 45						
		>10 ~ 22	845 ~ 855	45 ~ 55						

3) 淬火冷却介质和冷却方法的选择十分重要，对铬轴承钢而言，选用的淬火冷却介质应满足以下两个要求：零件有足够的冷却速度，即大于临界冷却速度；在 $M_s \sim M_f$ 区间内冷却速度应缓慢，达到减少组织应力和防止变形和开裂的目的。

考虑到轴承钢的淬透性好，可根据零件的大小选择淬火冷却介质，通常使用普通淬火油、快速淬火油、光亮淬火油、真空淬火油和分级淬火油等。

一般普通淬火油多用于 GCr15 钢制的直径在 12mm 以下的滚动体和套圈，也可用于 GCr15SiMn 钢球的淬火；质量分数为 10% ~ 22% 的碳酸钠水溶液多用于 GCr15 钢制的直径为 12.7 ~ 50mm 的滚动体；快速淬火油用于 GCr15 钢制的有效厚度 ≤19mm 和滚子直径在 30mm 以下的轴承零件的淬火，其冷却速度高于普通淬火油；另外光亮淬火油、快速光亮淬火油、真空淬火油、等温分级淬火油多用于在可控气氛炉中对中小轴承或大型截面轴承零件进行淬火，或在真空炉内进行轴承零件的热处理。由于淬火后零件的变形小，因此目前上述几类淬火油应用十分广泛。

轴承零件的淬火方法应根据质量要求、具体形状、厚度和尺寸而定，同时还与加热炉的类型、气氛等有直接的关系。GCr15、GCr15SiMn 作为代表性的钢种，二者在淬透性上稍有差异，通常 GCr15SiMn 用于制作大型轴承零件。

选择淬火方法和淬火冷却介质的基本原则是套圈的变形小、成本低、操作简单、质量稳定、可获得均匀的组织 and 性能等，通常的冷却方式为分级淬火、等温淬火、旋转压模、上下振动和自由落下。轴承钢常用的冷却方式和操作方法见表 7-10。

表 7-10 轴承钢常用的冷却方式和操作方法

零件名称	零件的直径或壁厚	冷却方式和操作方法	淬火冷却介质和温度
滚动体	大、中、小型滚柱（滚针）和钢球	零件自动摆筐、滚筒、斜板和振动导板滑落	油温 30 ~ 60℃ 水温 20 ~ 40℃
小、中型套圈	直径小于 200mm	手动上下窜动、自由摆动、强力搅拌、喷油冷却、使用振动淬火机等	油温 30 ~ 60℃
大型套圈	直径 200 ~ 400mm	手动旋转、使用淬火机和串筐、喷油冷却等	油温 30 ~ 60℃
特大型套圈	直径大于 1000mm 的薄壁套圈、直径为 40 ~ 1000mm 的套圈、滚柱（滚针）	吊架冷却、吹气搅油、使用旋转淬火机冷却、同时吹气换油	油温小于 70℃
薄壁套圈	直径小于 8mm	热油冷却后，放入低温油中继续冷却	热油 130 ~ 170℃ 冷油 30 ~ 80℃
超轻、特轻套圈	—	在高温油中冷却到油温后，放进压槽中冷到 30 ~ 40℃ 取出，或将加热、保温后的套圈放入压模中进行油冷	油温 30 ~ 60℃

4) 轴承零件淬火后质量的好坏直接影响到产品的使用寿命，因此在淬火后必须进行质量检查。轴承零件淬火后的质量检查见表 7-11。

表 7-11 轴承零件淬火后的质量检查

零件名称	检查项目	技术要求	检查方法
套圈	① 硬度 ② 显微组织 ③ 断口 ④ 断裂与其他缺陷 ⑤ 畸变（椭圆、挠曲、胀缩）	① 淬火后大于 63HRC ② 隐针或细小结晶状马氏体，均匀分布细小残留碳化物和少量残留奥氏体 ③ 具有细小晶粒，闪烁光泽，不允许欠热或过热 ④ 不允许有裂纹、脱碳、软点等缺陷	① 用洛氏、维氏或显微硬度计检查硬度 ② 用体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀放大 500 倍观察 ③ 压断后用肉眼观察 ④ 用冷酸洗的方法检查软点和脱碳，用金相法检查深度
	① 硬度 ② 显微组织 ③ 断口 ④ 裂纹及其他缺陷	① 钢球直径不大于 45mm，淬火硬度大于 64HRC ② 直径大于 45mm，淬火硬度大于 63HRC ③ 其余与套圈相同	⑤ 用外径测量仪、椭圆仪测量胀缩，用 G803 仪器检查挠曲

5) 轴承零件经过淬火处理后，可能出现一些不符合技术要求的质量问题，轴承零件淬火处理后常见的质量缺陷和防止措施见表 7-12。

表 7-12 轴承零件淬火处理后常见的质量缺陷和防止措施

检查项目	缺陷名称		产生原因	防止措施
硬度	硬度低	显微组织合格	① 保温时间短 ② 表面脱碳严重 ③ 淬火温度偏低 ④ 冷却速度慢或油温高	① 延长保温时间 ② 在保护气氛中加热 ③ 提高加热温度 10 ~ 15℃ ④ 提高冷却速度
		块状或网状托氏体	① 淬火温度低 ② 冷却不良	① 提高淬火温度或延长保温时间 ② 强化冷却效果
断口	欠热或过热		淬火温度低或过高	提高或降低淬火加热温度
	颗粒状断口		锻造过烧	降低锻造加热温度
	小亮点断口		网状碳化物级别超差严重	控制网状碳化物，按要求锻打
软点	局部软点（体积软点） 40 ~ 45HRC		① 锻造脱碳 ② 淬火温度低或保温时间短 ③ 冷却不良	① 控制锻造加热时间 ② 提高加热温度或延长时间 ③ 增强介质的冷却能力
	表面软点（低于正常硬度 2 ~ 3HRC）		① 碳酸钠水溶液配置不当 ② 介质温度较高 ③ 存在杂质	① 配置合格的冷却介质 ② 将介质的温度控制在 35℃ 以下 ③ 提高碳酸钠水溶液的浓度至质量分数为 15% ~ 20%

(续)

检查项目	缺陷名称	产生原因	防止措施
表面缺陷	氧化脱碳、 腐蚀严重	① 炉子的密封性差 ② 零件表面有锈蚀或不洁净 ③ 淬火温度高或保温时间长 ④ 锻件本身脱碳严重	① 改进炉子使其内部具有还原性气体 ② 除锈迹和清洗干净零件表面 ③ 严格执行工艺要求 ④ 粗车后再进行热处理
畸变	超过规定	① 组织不均匀，未退火或淬火温度高 ② 装炉量多或加热不均匀 ③ 冷却不均匀或过冷度大 ④ 冷却时相互碰撞	① 提高退火的均匀性，进行去应力退火或降低淬火温度 ② 合理装炉或提高加热和冷却的均匀性 ③ 在热油中冷却或压模淬火 ④ 消除加热和冷却过程零件的碰撞 ⑤ 采取整形的方法
裂纹	淬火裂纹	① 组织过热，淬火温度高或保温时间长 ② 冷却太快，油温低 ③ 应力集中 ④ 表面脱碳 ⑤ 未退火而直接退火 ⑥ 淬火后未及时回火	① 降低淬火温度 ② 提高出油温度或提高油温 ③ 降低车加工的表面粗糙度 ④ 采用可控气氛炉或盐浴炉加热 ⑤ 正火后再进行淬火 ⑥ 立即回火
显微组织	过热针状马氏体	① 淬火温度高或保温时间长 ② 原材料中有带状碳化物出现 ③ 碳化物分布、大小不均匀	① 严格执行热处理工艺，加强检查 ② 消除碳化物的带状组织 ③ 保证退火质量
	6~7级托氏体组织	① 淬火温度低或保温时间短 ② 冷却速度太慢 ③ 原材料中碳化物分布不均匀或退火不合格	① 提高温度或延长保温时间 ② 增强冷却效果 ③ 控制碳化物的不均匀性
	局部针状M+网状托氏体组织	① 退火组织不均匀 ② 提高淬火温度或延长回火时间 ③ 原材料的碳化物带状严重	① 重新退火 ② 降低淬火温度或缩短时间 ③ 提高淬火冷却介质的冷却能力，提高组织的均匀性
	碳化物网级别大于2.5级	① 原材料中网状碳化物超过规定 ② 锻造时停锻温度高或退火温度高 ③ 冷却后未及时回火	① 采用正火后处理或在保护性气氛中加热 ② 合理控制停锻温度和退火温度 ③ 立即回火

6) 轴承零件的冷处理。轴承作为十分重要的传动件，既要有高的硬度、高的耐磨性，同时又要有高的尺寸稳定性，冰冷处理可减少淬火组织中残留奥氏体的数量，提高零件的尺寸稳定性和提高基体的硬度和耐磨性，考虑到轴承钢淬火后有10%~15%（体积分数）的残留奥氏体，虽然经过回火处理，但不能使其全部转变和稳定化，在室温下长期工作或放置会因存在残留奥氏体而发生变化，因此冰冷处理十分重要。

① 冷处理温度一般根据 M_f 点和残留奥氏体的数量而定，同时也要考虑零件的力学性能、技术要求和形状等因素，通常温度控制在 $-60\sim -20^{\circ}\text{C}$ 范围内。

② 保温时间与装炉量有关，一般为 $1\sim 1.5\text{h}$ ，但冰冷处理不能使残留奥氏体转变完全。

③ 冷处理的操作方法。为了确保零件不出现残留奥氏体和陈化稳定现象，降低冷处理的效果，淬火后应立刻进行冰冷处理。个别零件直接进行冷处理会出现开裂，可在淬火后先进行 $110\sim 130^{\circ}\text{C}\times 30\sim 40\text{min}$ 回火。冰冷处理的零件升到室温后要立即回火。

7) 轴承的回火。用于消除残留应力，防止零件开裂，并使亚稳定组织转变为相对稳定的组织，能起到稳定尺寸、提高韧性、获得良好的力学性能的作用。回火温度和时间应根据零件本身的技术要求、装炉量的大小来确定，根据温度回火一般分为三种：常规回火（或低温回火）用于一般轴承零件的回火，稳定回火多用于精密轴承零件的回火，高温回火用于一些航空轴承或其他特殊轴承零件的回火。

为了确保轴承在使用状况下尺寸、硬度和性能的稳定，回火温度应比轴承的工作温度高 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，通常的回火温度为 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，对载荷较轻、尺寸稳定性较高的轴承采用 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，而对于处于高温作用下的轴承，可分别使用 200°C 、 250°C 、 300°C 、 400°C 等温度回火。在电炉、油炉、浴炉或硝盐炉中回火，时间为 $2.5\sim 12\text{h}$ 。高温轴承采用 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$ ，保温 $2.5\sim 12\text{h}$ 。轴承零件低温回火后的硬度要求见表 7-13，同一零件不同部位的硬度差应小于 2HRC。

表 7-13 轴承零件低温回火后的硬度要求

材 料	轴承零件名称	成品硬度 HRC
GCr15	套圈	61~65
	钢球	62~66（直径小于 45mm）， 60~66（直径大于 45mm）
	圆锥滚珠、球面滚珠、短圆柱滚柱	61~65
	关节轴承套圈	58~64
	滚针	61~65

(续)

材 料	轴承零件名称	成品硬度 HRC
GCr15SiMn	套筒	60 ~ 64
	钢球	60 ~ 66
	滚柱	61 ~ 65

轴承钢热处理前后的组织是有差异的，热处理前后的组织转变情况见表 7-14。

表 7-14 轴承钢热处理前后的组织转变情况

热处理工序 组织转变情况		退火→	淬火→	回 火
原始组织	正常锻造组织：片状珠光体 + 索氏体	正常退火组织：球状珠光体	正常淬火组织：隐晶及细小结晶马氏体 + 少量残留奥氏体 + 细小均匀分布的碳化物（冷处理后的组织形态与此相同）	正常淬火、回火组织：回火马氏体 + 残留奥氏体 + 残留碳化物（附加回火后的组织形态与此相同）
	正火组织：索氏体	正火后退火组织：细点状珠光体	正火后淬火组织：与正常淬火组织相同	

8) 轴承的稳定化处理。其目的是消除磨削加工应力，稳定组织，提高轴承零件的尺寸稳定性。温度一般比其正常回火温度低 20 ~ 30℃，通常采用加热温度为 120 ~ 160℃、保温 3 ~ 4h 的热处理工艺。

(2) 铬钢滚动轴承零件的感应加热热处理和贝氏体热处理 除采用整体热处理外，感应热处理也能得到要求的性能，经感应热处理后使用寿命提高 10% ~ 20%。该工艺广泛用于大批量生产的轴承套圈和滚动体等，具有节约能源、劳动条件好、便于实现机械化、零件的畸变量小和氧化脱碳少等优点。

一般中型轴承套圈的中频感应淬火的流程为：中频感应加热→振动淬冷机构在油池中冷却→清洗→工频感应加热回火。钢球的中频感应加热和保温与电阻炉加热相比具有时间短、效率高、脱碳轻和节省电力等特点。

轴承零件热处理后获得下贝氏体组织，可将断裂韧度提高 30% 以上，裂纹的扩展率小，表面表现为压应力，冲击韧度高、尺寸稳定性好，不易产生磨削裂纹，多用于工作条件差、润滑条件差并承受高冲击负荷等的轴承，铬轴承钢的贝氏体淬火具有以下工艺特点：淬火温度比常规温度高 20 ~ 30℃，需在可控气氛炉或盐浴炉中加热；淬火冷却介质为 KNO₃ 与 NaNO₂ 质量分数均为 50% 的硝酸盐溶液，温度为 220 ~ 240℃；零件表面呈压应力分布，提高了轴承的接触疲劳强度，无淬火裂纹出现；尺寸稳定性好，有优良的力学性能；热应力和热变形小。

GCr15、GCr18Mo 钢的贝氏体等温淬火工艺规范见表 7-15。

表 7-15 GCr15、GCr18Mo 钢的贝氏体等温淬火工艺规范

材料牌号	套筒壁厚/mm	淬火工艺规范		
		温度/℃	保温时间/min	盐浴等温温度与时间
GCr15	≤10	835 ~ 860	60	盐浴温度 220 ~ 240℃，保温 4h
	> 10 ~ 14	860 ~ 864		
	> 14 ~ 18	870 ~ 880		
	> 18 ~ 22	860 ~ 880		
	> 22 ~ 55	875 ~ 885		
GCr18Mo	40 ~ 45	885 ~ 890		盐浴温度 220℃，保温 8h
	45 ~ 60	890 ~ 895		
	50 ~ 60	895 ~ 900		
	55 ~ 60	900 ~ 905		

(3) 铬钢套圈的热处理 通常该套圈采用盐浴炉加热淬火处理，如采用连续式网带炉或推杆式保护气氛炉加热，则三段加热的中间区域的炉温应比其他区域低 5℃左右。盐浴炉中的保温系数按 1.2 ~ 1.5min/mm 计算，淬火冷却介质为 30 ~ 80℃的 L-AN10 或 L-AN20 机械油，根据轴承的壁厚也可选择 120 ~ 180℃或 80 ~ 100℃的热油冷却。

(4) 一般铬钢钢球的热处理工艺（表 7-9）

(5) 不锈钢轴承钢与耐热轴承钢的热处理工艺 不锈钢具有良好的耐蚀性，最常用的为 102Cr17Mo（9Cr18Mo），因为高碳钢硬度高，粗大的碳化物对耐蚀性有害而降低疲劳寿命，因此为了提高耐蚀性，需要进行低温回火，表面的性能良好时方可使用。表 7-16 为 102Cr17Mo 钢的热处理工艺规范，图 7-5 所示为其淬火与回火硬度曲线，通常可生成 20% ~ 30%（体积分数）的残留奥氏体，因其对尺寸稳定性有害，必须进行冷处理。

表 7-16 102Cr17Mo 钢的热处理工艺规范

钢 号	退 火 工 艺		淬火、回火工艺		
	温度/℃	硬度 HBW	淬火温度/℃	回火温度/℃	硬度 HRC
102Cr17Mo	800 ~ 920 缓冷	260 以下	1010 ~ 1070 油冷	100 ~ 180 空冷	58 以上

耐热轴承钢可保证轴承在使用温度下有合适的高温硬度以及疲劳强度和组织与尺寸的稳定性，表 7-17 为耐热轴承钢的热处理工艺规范。Cr4Mo4V 钢的回火温度高，残留奥氏体几乎全部分解，尺寸稳定性较好，但是通常仍需要进行冷处理。

在超高速运转等载荷非常高的场合下工作时，除了必须具备高温硬度、耐冲击

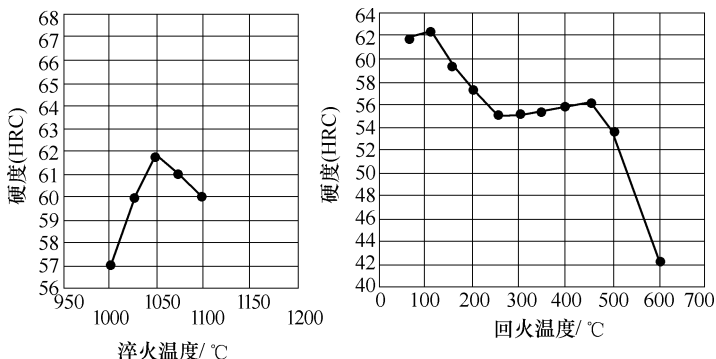


图 7-5 102Cr17Mo 钢的淬火与回火硬度曲线

性能外, 采用 H10Cr4Mo4NiV 钢等低碳耐热钢时, 要进行渗碳处理。渗碳时必须进行氧化预处理, 同时为了提高高温硬度而添加了碳化物形成元素, 易生成粗大碳化物, 渗碳极为困难, 为改善渗碳性能, 碳化物形成元素添加量下降时, 高温硬度也会相对降低。

耐热轴承钢的热加工方法为形变热处理, 变形的诱导产生了析出硬化, 比普通淬火的疲劳强度提高 9 倍, 但由于切削、研磨等困难及成本问题, 目前应用受到一定程度的限制。

表 7-17 耐热轴承钢的热处理工艺规范

钢 号	退火温度/°C	淬火温度/°C	回火温度/°C
Cr4Mo4V	820 ~ 830 炉冷	1095 ~ 1150 油冷	510 ~ 550 空冷
H10Cr4Mo4NiV	700 炉冷	1100 ~ 1120 油冷	525 ~ 550 空冷
W6Mo5Cr4V2	800 ~ 880 炉冷	1200 ~ 1240 油冷	540 ~ 570 空冷
W18Cr4V	820 ~ 880 炉冷	1250 ~ 1290 油冷	550 ~ 580 空冷

注: 表中 H10Cr4Mo4NiV 的淬火温度是渗碳后的淬火温度。

(6) 其他轴承零件的热处理 除了套圈和滚动体外, 轴承还有保持架、铆钉等零件。保持架用于确保滚动体间彼此的间隔, 阻止相互之间的冲撞和摩擦, 又有防止滚珠歪斜的作用; 在轴承运动过程中与轴承套圈和滚动体之间发生滑动摩擦, 同时又受到离心力的作用。

1) 对零件的性能要求。根据轴承零件的工作特点和性能要求, 保持架和铆钉应具有: 高的硬度和良好的耐磨性; 良好的导热性能, 小的摩擦因数; 良好的工艺加工性)。

2) 材料的选择。保持架常用金属材料及其用途见表 7-18。

表 7-18 保持架常用金属材料及其用途

材 料 牌 号	主 要 用 途
08、08F、10、10F	制作各种形状的冲压保持架、防尘罩、挡圈和密封圈等
ML15、ML20	制作铆钉、长圆柱和螺旋滚子轴承等轴承的支柱等
20、40、45	制作大型轴承支柱、大型圆锥轴承内外隔圈和保持架
40CrNiMoA	制作高温、高速轴承实体的保持架、齿圈和铆钉等
06Cr19Ni10、12Cr18Ni9、 1Cr18Ni9Ti ^① 、14Cr17Ni2	制作防锈性能好的保持架、齿圈和铆钉等
T8A、T10A	制作冠形保持架、齿圈、铆钉等
H62、H96	制作冲压保持架和铆钉等
HPb59-1	制作高强度实体保持架和保持架挡圈等
QA110-3-1.5	制作高温、高速实体保持架等，工作温度不高于 200℃
QSi1-3	制作实体保持架、挡盖和关节轴承内套等
QSi3.5-3-1.5	制作高温、高速实体保持架等，工作温度不高于 315℃
2A11、2A12	制作高温、高速实体保持架等
T2、T3	制作冲压铆钉等

① GB/T 1220—2007 中取消了此牌号。

3) 常见材料的热处理工艺如下：铆钉进行冷成形后软化退火，材料为 ML15、ML20，600 ~ 650℃ × 3 ~ 4h 炉冷至 200℃ 出炉空冷，无须退火。

挡圈的材料为 08、10 低碳钢，进行氮碳共渗处理，硬度大于 40HRC，渗层深度为 0.4 ~ 0.7mm，表面为银白色，工艺为 250 ~ 300℃ × 30 ~ 60s + 540 ~ 560℃ × 2 ~ 3h，水冷。

保持架材料不同，处理工艺也不尽相同，具体见表 7-19。

表 7-19 各种材质的保持架的热处理技术要求和热处理工艺

材 料	技 术 要 求	工 序 名 称	热 处 理 工 艺	备 注
08、10	消除加工应力	软化退火	590 ~ 610℃ × 3 ~ 5h，炉冷至 100℃ 出炉空冷	
45	241 ~ 285HBW	调质处理	840 ~ 860℃，加热系数为 1 ~ 1.5min/mm，水冷，进行 560 ~ 580℃ × 15 ~ 20min 热 处 理 后 空 冷	
1Cr18Ni9Ti	消除加工硬化	淬火	1100 ~ 1120℃ × 0.5 ~ 1.0h，水冷，水温应在 40℃ 以下	在真空炉内进行

(续)

材 料	技 术 要 求	工 序 名 称	热 处 理 工 艺	备 注
40CrNiMoA	硬度为 30 ~ 37HRC	淬火 + 高温回火	845 ~ 855℃ × 1 ~ 1.5h, 油冷, 580 ~ 600℃ × 2 ~ 3h 回火	
H62	消除加工硬化	软化退火	600 ~ 650℃ × 0.5 ~ 3.0h, 封 箱退火, 炉冷到 100℃	冷加工后必须消除 内应力, 进行 270 ~ 320℃ × 2 ~ 3h 处理
QAl10-3-1.5	① 202 ~ 269HBW ② 130 ~ 241HBW	固溶 + 时效	845 ~ 855℃ × 1h 水冷, 630 ~ 650℃ × 4h	
HPb59-1	消除加工硬化	软化退火或 去应力退火	490 ~ 510℃ (495 ~ 505℃) × 20 ~ 40min	括号内为去应力退 火温度
2A11、2A12	硬度 > 60HRB	固溶 + 时效	600 ~ 650℃ (285 ~ 300℃) × 2 ~ 4h 水冷	括号内为固溶处理 温度

4) 冲压滚针轴承套圈等零件的热处理。对于需要一定耐冲击强度、热处理变形小、耐磨性好的轴承套圈, 应进行渗碳、碳氮共渗等表面淬火处理, 常选用的材料有 08、10 等低碳钢。表 7-20 列出了冲压滚针轴承套圈壁厚与碳氮共渗层深度的关系, 需要注意渗碳、碳氮共渗深度要考虑轴承套圈的负荷状态以及接触部分的形状等。

表 7-20 冲压滚针轴承套圈壁厚与碳氮共渗层深度的关系

套圈的壁厚/mm	碳氮共渗层厚度/mm
≤0.5	0.07 ~ 0.11
>0.5 ~ 1.5	0.07 ~ 0.12
>1.5 ~ 2.0	0.08 ~ 0.15
>2.0 ~ 2.5	0.12 ~ 0.20
>2.5 ~ 4.0	0.15 ~ 0.25
>4.0 ~ 6.0	0.20 ~ 0.30
>6.0 ~ 10	0.25 ~ 0.35

另外, 从 JB/T 8881—2011《滚动轴承 零件渗碳热处理 技术条件》中可知, 镍铬钼渗碳钢也得到了推广与应用, 如 G20CrMoA、G20CrNiMoA、G20CrNi2MoA、G20Cr2Ni4A、G20Cr2Mn2MoA、G10CrNi3MoA 等, 镍铬钼渗碳钢中三种元素以及碳的含量配比合理, 获得良好的合金化效果, 不仅具有良好的渗碳工艺性能, 经过渗碳淬火后可获得比较理想的渗碳表面硬度及心部组织。渗碳轴承套圈经过一次、二次淬火, 其心部金相组织为板条马氏体 (图 7-6a), 板条马氏体形成温度高, 在形成

过程中会析出碳化物，易被浸蚀呈现较暗的颜色。经过二次淬火后，渗碳层的金相组织为隐针、细针状马氏体和均匀分布的粒状碳化物以及残留奥氏体（图 7-6b）。

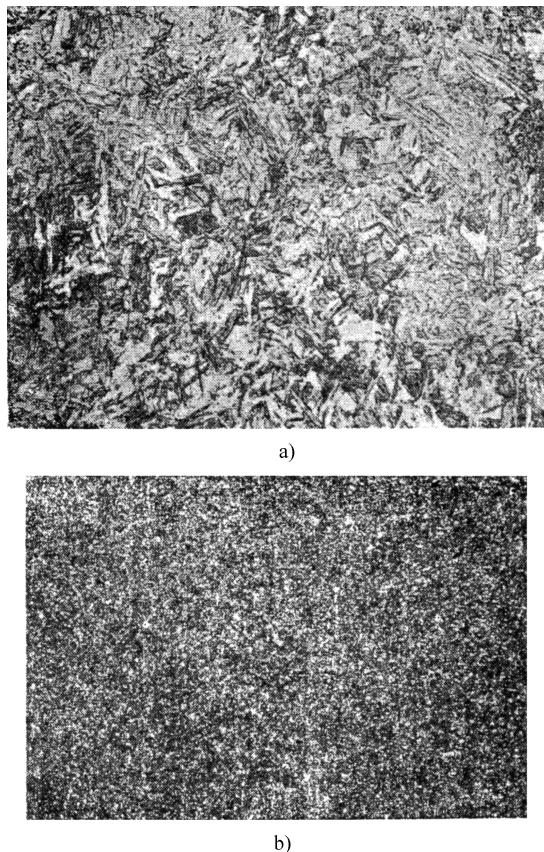


图 7-6 197726 渗碳轴承内圈经过一次淬火、两次淬火后的心部组织与
渗碳层组织（ $\times 500$ ）

a) 心部组织 b) 渗碳层组织

下面介绍轴承套圈经碳氮处理后的技术要求。碳氮处理后的硬度要求为：套圈 664 ~ 795HV（或 629 ~ 697HV），垫圈和保持架 613 ~ 697HV（或 484 ~ 619HV），锁圈 392 ~ 446HV（或 434 ~ 484HV），罩壳 302 ~ 345HV。渗层深度参照表 7-20 执行。淬火后的组织为细针状马氏体。表面不允许有锈迹、麻点和裂纹等。

轴承零件的热处理基本流程和工艺为：零件的清洗→中温液体或气体碳氮共渗→冷却→清洗→回火→清洗和防锈。

中温液体或气体碳氮共渗的工艺为 $(850 \pm 10)^\circ\text{C} \times 30 \sim 60\text{min}$ ，盐浴中各成分的质量分数为 40% NaCN + 35% NaCl + 25% Na_2CO_3 ，其中 NaCN 的质量分数在共渗

前应为 20% ~25%，该工艺由于有毒已经停止使用。气体碳氮共渗的介质为煤油、氨气、甲醇等，具有原料易购、操作方便、质量稳定、设备简单、成本低等特点，在工业生产中得到了广泛的应用。

完成碳氮共渗后的零件要进行淬火处理以获得高的表面硬度，提高其耐磨性和使用寿命等，通常采用 30 ~80℃ 的 L- AN10 或 L- AN20 油作淬火冷却介质，对于硬度需要达到 30 ~35HRC 的零件，采用水冷即可。表面硬度与回火温度和时间的关系见表 7-21。

表 7-21 表面硬度与回火温度和时间关系

零件的表面硬度 HV	回火温度/℃	回火时间/h
720 ~ 832	150 ~ 160	2 ~ 3
619 ~ 697	180 ~ 200	2 ~ 3
484 ~ 619	250	2 ~ 3
434 ~ 484	350	45min
392 ~ 446	370	45min

零件的清洗和防锈是回火后的一项重要工作，尤其是对盐浴处理的零件而言至关重要。通常是在质量分数为 10% ~ 20% 的亚硝酸钠水溶液中进行防锈处理。图 7-22所示为 GCr15、GCr15SiMn 钢加热温度、保温系数同套筒厚度的关系。

表 7-22 GCr15、GCr15SiMn 钢加热温度、保温系数同套筒厚度的关系

钢 号	GCr15			GCr15SiMn		
有效厚度/mm	≤6	> 6 ~ 8	> 8 ~ 15	> 8 ~ 13	> 13 ~ 20	> 20
加热温度/℃	840 ~ 850	845 ~ 855	850 ~ 860	840 ~ 850	845 ~ 855	850 ~ 860
保温系数/(min/mm)	1. 5	1. 4	1. 25	1. 4	1. 2	1

淬火冷却介质为 10 号或 20 号机械油，油温为 30 ~65℃，马氏体级别小于 3 级，硬度大于或等于 63HRC，组织为隐晶马氏体 + 细小结晶马氏体 + 残留合金渗碳体 + 残留奥氏体。

回火是在油炉或硝盐炉中进行的，为获得高硬度和较高的强度和韧性，GCr15 钢一般的回火温度为 150 ~160℃，而 GCr15SiMn 钢为 150 ~180℃。为了得到稳定的组织和消除内应力一般回火 36h。套筒的硬度为 61 ~ 65HRC，滚动体硬度为 62 ~ 66HRC。

目前国内已有轴承套圈淬火机，实现了自动化操作，其装置如图 7-7 所示。

精密轴承需采取以下措施：

① 补充回火（附加回火）。应在磨削加工后进行补充回火，所用温度比原回火温度低 20 ~30℃，时间为 3h。这是考虑到磨削加工产生的应力使原残留应力重新

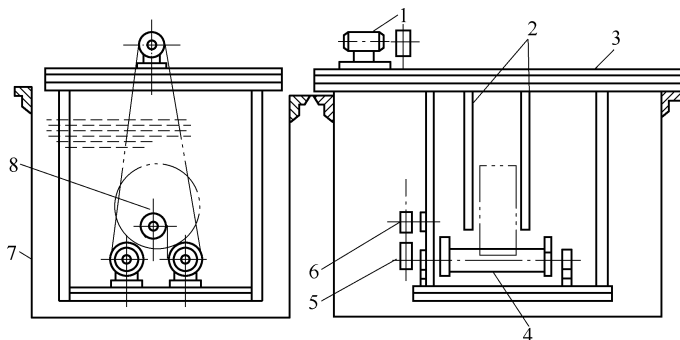


图 7-7 轴承套圈淬火机

1—电动机 2—隔架 3—支架 4—辊子 5—链轮 6—惰轮 7—淬火油槽 8—工件

分布，引起尺寸变化甚至导致表面龟裂，补充回火的目的是消除磨削加工应力，进一步稳定组织，提高轴承的尺寸稳定性。一般轴承的精度越高，回火时间越长。

② 冷处理。由于轴承钢的 M_s 点为 245°C ， M_f 是 -70°C ，因此室温下有更多的残留奥氏体，在使用过程中残留奥氏体会分解导致轴承零件尺寸的变化，冷处理能减少组织中的残留奥氏体量，使组织更加稳定，尺寸稳定性提高。一般超精级以及经过分级淬火的轴承钢套圈才需要进行冷处理，冷处理的工艺温度为 $-80 \sim -70^{\circ}\text{C}$ ，停留时间为 $1 \sim 1.5\text{h}$ （使全部零件达到要求的低温为止），取出后待零件在空气或水中温度回升到室温后，立即进行回火处理。

7.3 标准件（螺母、螺栓和销轴等）的热处理

1. 工作条件和技术要求

在汽车结构所需要的部件中，冷锻零件占有十分重要的地位，主要是指采用冷锻制造的紧固件，如铆钉、螺栓、螺母以及壳体等。螺栓、螺母、弹簧垫圈和销轴在机械行业和汽车生产中，起到联接、紧固、定位以及密封零件的作用，因此要求拧紧螺栓必须均匀拉伸，其本身要承受预紧力的作用，应具有高的抗拉强度和抗弯强度，同时具有一定的抗剪切能力等。螺栓、螺母、弹簧垫圈和销轴的应用十分广泛，在实际工作中它们要承受拉力、压力、剪切力、扭转力及摩擦力等外力的综合作用，同时汽车在行驶过程中，螺栓联接零件的载荷不同，故应力状态不尽相同，因此制作紧固件的材料应具有高的强度和韧性，同时要求耐磨性好，零件表面不允许有脱碳现象。

2. 材料的选择和加工流程

(1) 材料的选择 根据紧固件工作条件的侧重点不同，材料的选择如下：螺栓、螺母采用 Q235、10、15、35、40Cr、65Mn 等；弹簧垫圈采用材料为 65Mn、

50CrV 等;销轴采用 45 等中碳钢或合金结构钢等。

关于材料的具体选用原则和技术要求,一般按下列几项具体执行:冷锻冷挤件采用中碳钢或中碳合金钢,螺栓螺母精度在 8 级以上的进行渗碳或碳氮共渗;要求有高强度、良好的塑性和韧性、低的缺口敏感性、具有一定的抗弯强度的零件采用铬钼钢和铬钼钒钢;在高温下工作,要求有较高的抗松弛性能,具有抗氧化性和足够的强度时应采用不锈钢;要求高温下具有耐蚀性时,选用不锈钢;要求低温下有好的韧性的零件,选用 35CrMo;在摩擦环境条件下工作的零件,要求进行渗碳、碳氮共渗或渗氮处理。

(2) 生产加工流程 汽车使用的各种各样的冷锻零部件均为大批量、流水线作业生产,该类零件起着联接汽车各部件的重要作用,一旦失效,轻者汽车无法行驶,重者会车毁人亡,因此其产品质量的好坏直接关系到能否正常使用。汽车使用的常见标准件的机械加工工艺流程比较简单,冷锻零件在成形后要进行热处理,来获得要求的组织、性能和消除加工应力,确保标准件的产品质量和技术要求,下面为其主要流程。

1) 螺母:下料→冷锻成形→淬火→回火→加工螺纹→表面处理→成品检验。

2) 螺栓:下料→冷锻成形→六角整形→预先加工→加热螺纹→淬火→回火→表面处理→成品检验。

3) 铆钉:下料→冷锻成形→再结晶退火。

3. 紧固件的质量要求

在标准件的实际生产过程中,为了获得理想的力学性能和技术要求,对用于制造标准件的原材料具有一定的要求,只有这样才能确保零件的产品质量,通常的要求如下:高频感应淬火螺栓单边脱碳层深度不大于 $1.0\% D$,冷拔用钢小于 $1.5\% D$;晶粒度不粗于 8 级;硬度及力学性能符合要求。

汽车用大多数螺栓、销冷拔后表面不再加工,因此表面的脱碳层会一直存在于零件的表面。由于螺栓的螺纹经过滚压加工,脱碳层被挤到螺纹的顶部,将造成螺纹强度的降低,会发生脱扣现象,因此要对脱碳层进行严格的要求,防止出现早期的紧固件失效。

螺栓本身在工作过程中有很明显的应力集中现象,加上制造精度问题、安装不当或结构比较特殊等众多因素,还有可能因偏斜拉伸产生附加载荷,因此在实际生产过程中对选用材料的相对韧性、塑性及强度有一定的要求,目的是减少或消除它对偏斜、缺口应力集中和表面质量的敏感性,提高螺栓的使用寿命。

4. 紧固件的热处理工艺

(1) 螺栓、螺母的热处理 根据标准件的受力状态螺栓一般分为三个级别:木螺栓、一般螺栓和重要螺栓等。其中木螺栓用于联接木制的结构部件,仅起到联接紧固的作用。通常采用 10、15 钢等制造,无须热处理和金相检验;一般螺栓承

受较大载荷,用于固定和密封汽车上不很重要的零部件,多用 35 钢采用调质处理,以提高抗拉强度和疲劳强度等,硬度一般为 244~285HBW,多用作变速器壳螺栓、油底壳螺栓等,为消除冷成形过程中出现的加工硬化现象,在冷拔、冷镦前要进行球化退火,使片状珠光体转变为球状珠光体组织;重要螺栓用于联接和固定汽车中的重要零件,在工作状态下要承受很大的载荷作用,而且受力状态较为复杂,大多采用中碳合金钢经过调质处理,硬度为 255~321HBW,从而获得良好的韧性和足够的强度,作为有特殊要求的标准件它们本身具有上述力学性能,来满足其工作条件和环境的需要。

需要注意的是采用低碳钢制造的高强度螺栓等已经应用于汽车上,经过淬火+低温回火后硬度控制在 33~39HRC 或 35~42HRC 两种范围内,其组织为低碳马氏体,同时考虑到含碳量较低,在冷镦或冷拔前可免去球化退火工艺,因此不失为一种降低制造成本的措施。

1) 冷拔成形零件的热处理。要求紧固件中硫、磷、锰和硅的含量要低,质量要求十分严格,成形后采用再结晶退火处理,以消除冷拔过程中的加工硬化,恢复材料冷拔前的塑性和获得细晶粒的组织,即获得需要的力学性能。其中铜的晶粒度对其冷加工性能有较大的影响,具有细晶粒组织的合金强度高,加工成形后的表面质量好,但变形抗力较大,故成形难度大,而粗的晶粒组织易于加工,但表面质量和疲劳性能差。因此应注意变形量与再结晶时晶粒度的关系,并防止晶粒的长大,尤其是用于压力加工的黄铜要进行再结晶退火处理,同时根据要求合理控制晶粒度。

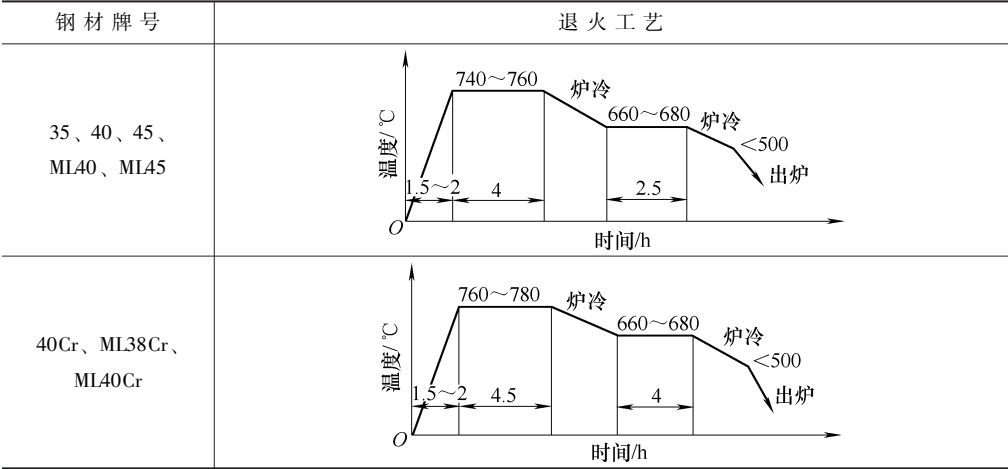
对于 Q235、ML15、20、ML20、15Cr、20Cr、15MnB、15MnVB、20MnTiB 等材料,再结晶退火采用 $660\sim 720^{\circ}\text{C} \times 2\sim 3\text{h}$ 、炉冷到 550°C 出炉冷却工艺。

对于 30、30Mn、35、35Mn、30CrMo、35CrMo、40、40Mn、42CrMo、45、45Mn、40Cr、ML30、ML40Cr 材料,采用 $700\sim 780^{\circ}\text{C} \times 4\sim 6\text{h}$ 、炉冷到 550°C 出炉冷却工艺。

纯铜如 T2、T3 的再结晶退火工艺规范为 $550\sim 620^{\circ}\text{C} \times 60\sim 70\text{min}$,黄铜如 H62 的再结晶退火工艺规范为 $400\sim 450^{\circ}\text{C} \times 70\sim 90\text{min}$,而特殊钢如 06Cr19Ni10、1Cr18Ni9Ti 等的再结晶退火工艺规范为 $700\sim 780^{\circ}\text{C} \times 120\sim 140\text{min}$ 。

2) 冷镦、冷挤件的热处理。冷镦、冷挤件常采用球化等温退火工艺以提高塑性,其退火工艺见表 7-23,退火后在铁素体基体上均匀分布着球状碳化物组织,降低了硬度、改善了塑性、冷成形时不再产生裂纹。另外为改善切削加工性,形成片状珠光体组织,加工后不断屑、不粘刀和表面光洁。对碳素钢、低碳低合金钢进行正火处理,加热温度为 $860\sim 880^{\circ}\text{C}$,保温 2~3h 后出炉空冷。而对中碳钢和中碳合金结构钢进行完全退火即 $840\sim 860^{\circ}\text{C}$ 保温,炉冷至 500°C 出炉冷却。需要注意加热温度的选择,应在该钢的临界温度以下进行较长时间的保温,以使渗碳体发生球化,获得要求的金相组织。

表 7-23 钢材球化等温退火工艺



注：在电炉内加热时，加热温度可降低 20℃ 左右。

3) 常见 35 钢、45 钢螺栓和螺母的热处理工艺见表 7-24。低合金结构钢螺栓、螺母的热处理工艺见表 7-25。常见不锈钢制标准件的热处理工艺见表 7-26，不锈钢的热处理应在可控气氛炉或无氧化的热处理炉中进行，奥氏体和铁素体不锈钢的强化处理通常采用冷作硬化，滚压螺纹冷拉、冷锻后其强度提高，马氏体不锈钢紧固件一般进行淬火和回火处理，可获得高的硬度。

表 7-24 常见 35 钢、45 钢螺栓和螺母的热处理工艺

钢 号	螺母、螺栓 的规格	淬火温度 /℃	淬火冷却介质	回火温度 /℃	冷却介质	硬度 HRC
35	< M16	830 ~ 850	质量分数为 5% 的 NaCl 水溶液	440 ~ 460	空气	30 ~ 36
				460 ~ 520	空气	25 ~ 30
				520 ~ 580	空气	18 ~ 25
	> M16	840 ~ 860	质量分数为 5% 的 NaCl 水溶液	440 ~ 460	空气	30 ~ 36
				460 ~ 520	空气	25 ~ 30
				520 ~ 580	空气	18 ~ 25
45	< M16	810 ~ 830	质量分数为 5% 的 NaCl 水溶液	420 ~ 460	空气	35 ~ 40
				460 ~ 490	空气	30 ~ 36
				490 ~ 540	空气	25 ~ 30
	> M16	820 ~ 840	质量分数为 5% 的 NaCl 水溶液	540 ~ 590	空气	18 ~ 25
				410 ~ 450	空气	35 ~ 40
				450 ~ 490	空气	30 ~ 36
30Mn		850	质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液	490 ~ 540	空气	18 ~ 25
				550	空气	18 ~ 25

表 7-25 低合金结构钢螺栓、螺母的热处理工艺

钢 号	螺母、螺栓公称直径/mm	淬火温度/℃	淬火冷却介质	回火温度/℃	冷却介质	硬度HRC
35CrMo 40Cr	≤20 > 20 ~ 39 > 39 ~ 50 > 50 ~ 90	840 ~ 860 840 ~ 860 860 ~ 880 870 ~ 890	油 油 油 油或水	620 ~ 650 600 ~ 630 580 ~ 610 560 ~ 600	油或水	24 ~ 32
40Cr	25 ≤20	850 840 ~ 860	油	500 540 ~ 560		28 ~ 33
42CrMo	≤60	830 ~ 840		570 ~ 600		30 ~ 35
30CrMnSi	< 25	890	370℃ 硝酸盐浴		油或水	
	25	880	油	540		
	60			540 ~ 560		
30CrMo 38CrSi	≤20 22 ~ 36	860 ~ 880	水淬油冷	600 ~ 630 570 ~ 590		
35CrMo	25	850	油	500		
40B	25	840	水	550	水	
35CrMoV	25 55 ~ 85 > 85 ~ 130	860	油	600	油	
25Cr2MoVA	25 55 ~ 85 > 85 ~ 130	900		620	空气	

表 7-26 常见不锈钢制标准件的热处理工艺

材料牌号	热处理规范				硬度 HBW	备 注
	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	冷却介质		
12Cr13	1000 ~ 1050	水或油	700 ~ 790	水、油或空气		
	925 ~ 1000	油	230 ~ 370	空气	360 ~ 380	回火时间 为 2h
			540		260 ~ 330	
			600		210 ~ 250	
			650		200 ~ 230	
	再结晶退火温度和时间 为 760℃ × 2h，炉冷至 600℃ 出炉空冷				170 ~ 200	供中间退火作参考

(续)

材料牌号	热处理规范				硬度 HBW	备 注
	淬火温度 /℃	冷却介质	回火温度 /℃	冷却介质		
20Cr13	1000 ~ 1050	水或油	700 ~ 790	空气		
	1050	空气	500			
			600			
		油	660			
	再结晶退火温度和时间为 760℃ × 2h，炉冷至 600℃ 出炉空冷					供中间退火作参考
14Cr17Ni2	950 ~ 975	油	275 ~ 300	油		
	1030		680			
	再结晶退火温度和时间为 760℃ × 2h，炉冷至 600℃ 出炉空冷					供中间退火作参考
1Cr18Ni9Ti	1100 ~ 1150	水				退火
	1000 ~ 1050		时效：800℃ × 10h			时效
	850					供中间退火作参考

切削成形的螺栓和螺母的表面应无脱碳层，必须在脱氧良好的盐浴炉中进行热处理。但对于冷锻成形零件，原材料的脱碳层仍然存在，被挤向牙尖，因此为确保产品质量必须在能控制碳势的可控气氛炉中进行适度复碳处理。对具有不同脱碳层的螺栓进行反复的装卸试验，结果表明螺栓表面脱碳直接影响使用寿命，见表 7-27。

表 7-27 螺栓螺纹脱碳对使用寿命的影响

名 称	螺栓规格	编 号	试 验 结 果			脱碳层深度	
			转矩 /J	次数	结论	总脱碳层 深度/mm	全脱碳层 深度/mm
柱螺栓	M10 × 1.5	1	40	15	脱扣	0.72	0.61
		2	40	4	脱扣	0.90	0.77
		3	40	4	未脱扣	不明显	—
		4	40	30	未脱扣	不明显	—
	M12 × 1.75	1	104	7	脱扣	0.72	0.54
		2	104	6	脱扣	不明显	—
		3	102	2	脱扣	0.99	0.72

(续)

名 称	螺栓规格	编 号	试 验 结 果			脱碳层深度	
			扭矩 /J	次数	结论	总脱碳层 深度/mm	全脱碳层 深度/mm
柱螺栓	M12 × 1. 75	4	102	10	未脱扣	不明显	—
		5	102	10	未脱扣	轻微脱碳	—
	M14 × 2	1	120	—	脱扣	轻微脱碳	—
		2	120	10	未脱扣	0. 63	0. 36

螺栓是采用冷拔工艺制成的，在制造过程中有时因材料表面本身存在发纹，导致端部开裂，冷拔时常见的缺陷是横向裂纹，此时检查会发现裂纹附近有塑性变形现象。因此对螺栓而言，冷拔工艺不当或材料自身的缺陷均会造成零件的报废。

由于标准件的生产批量大，对螺纹部分要求十分严格，因此其热处理设备应具有生产能力大、自动化程度高、热处理质量稳定、设备造价和运行成本低等特点。在实际生产过程中保护气氛连续作业炉已经得到较为广泛的应用，其主要炉型有振底炉、网带炉和铸链炉等，其中振底炉和网带炉用于中小规格的紧固件，而铸链炉多处理较大尺寸的零件。热处理工艺应根据使用设备的性能、装炉方式、零件尺寸的大小以及结构特点等为依据来正确制定。一般淬火保温时间在采用盐炉装筐时为 0. 4 ~ 0. 5min/mm，单件加热时为 0. 3min/mm；气体加热炉堆放时为 1. 2 ~ 1. 5min/mm，散状为 1 ~ 1. 2min/mm。如采用连续式作业炉，则在有效加热区的加热时间为 20 ~ 60min。冷却介质的选择原则是要有足够的冷却能力，冷锻用钢比非冷锻钢的冷却速度大一些，对于碳质量分数高于 0. 4% 的零件要考虑畸变和开裂的预防。

一般吸热式气氛、滴注式气氛和氨基气氛（含空气氮、氨燃烧气氛、净化放热式气氛等）均可用于标准件的加热保护或用作复碳气氛，有效控制炉内的碳势。

另外对于专用螺纹紧固件而言，自攻螺钉、自攻锁紧螺钉和自钻自攻螺钉等采用渗碳钢制造，表面有高的硬度有利于切削和挤压，同时心部有足够的强度和韧性，以防止在工作过程中发生扭曲或折断，国内外标准件制造厂采用网带炉或振底炉连续生产线进行渗碳或普通的热处理，可根据渗层深度确定合适的渗碳时间。耐腐蚀紧固件可用普通钢制造，表面镀锌、镀铬处理或采用化学热处理可提高标准件的耐蚀性。

汽车用紧固件在制造和使用过程中会出现生产废品和失效（表 7-28），对出现问题的产品必须进行认真分析，通过检测得出正确的结论，从而防止类似事件的发生，为正确制造紧固件提供技术依据。

表 7-28 常见紧固件的典型失效形式和特征

失效类型	宏观特征	微观特征	产生原因
冷镦横向开裂	多在变形严重的部位开裂，热酸浸后可见沿流线开裂，边缘有塑性变形	在金相显微镜下可见明显的塑性变形现象，是折叠裂纹	① 冷镦工艺调整不当 ② 原材料硬度过高或过软 ③ 金相组织不佳
冷镦纵向开裂	螺栓的头部有裂口，酸浸后杆部有发纹	裂纹附近组织无变化	钢材表面有发纹
	螺栓头部有 45° 的裂口		① 材料的塑性差 ② 金相组织不良
切变时开裂	六角头螺栓的头部有撕裂裂纹，边缘有塑性变形	裂纹附近有明显的塑性变形	① 原材料过软或过硬 ② 切变刀不锋利或间隙太小 ③ 切变工艺调整不当 ④ 夹杂物含量过高
螺栓掉头	在螺栓受力最大位置处具有脆断特征	① 热处理后回火不足，硬度偏高 ② 进行的再结晶退火不充分 ③ 组织中晶粒过于粗大	① 出现应力腐蚀 ② 再结晶退火不充分或热处理工艺不合理 ③ 电镀中出现氢脆或冷镦工艺不当 ④ 发生应力腐蚀 ⑤ 原材料质量不佳
早期断裂	① 拉长变形断裂 ② 早期的疲劳断裂，多出现在尖角或应力集中处	① 基体的强度不足 ② 游离态铁素体含量过多 ③ 螺纹的根部严重脱碳	① 回火温度过高 ② 原材料的淬透性不好 ③ 螺纹的表面严重脱碳
螺栓拉长变形	螺纹的根部变细，有塑性变形	① 原材料强度低 ② 表面有脱碳	① 硬度过低，强度明显下降 ② 严重脱碳 ③ 外加载荷过大

(2) 弹性垫圈、挡圈的热处理（材料通常为 65Mn、70、60Si2Mn 等） 该类零件一般不经热处理可直接使用，性能要求严格的弹簧垫圈、挡圈等采用中碳钢或合金中碳钢调质后使用，弹性垫圈（分为弹簧垫圈、齿形或锯齿形锁紧垫圈、鞍形或波形弹性垫圈等三种）和弹性挡圈等采用弹簧钢制造，其热处理工艺与弹簧的热处理相似。通常弹簧垫圈、挡圈应进行拔丝处理，要求球化退火后保证晶粒细致，得到均匀的球状碳化物组织，硬度为 90～95HBW。

1) 拔丝处理后在盐浴炉中进行退火，750℃×0.5h+620℃×0.5h，或在其他保护性气氛中加热，但应具有保护措施，严禁表面出现氧化或脱碳等缺陷。

2) 常见材料制作弹性垫圈和挡圈的热处理工艺规范。65Mn：820～840℃×

8 ~ 15min。60Si2Mn：860 ~ 880℃ × 8 ~ 15min。70 钢：780 ~ 830℃ × 8 ~ 15min，也可在可控气氛炉中加热 15 ~ 30min，油冷后在 150 ~ 180℃ 回火，硬度为 58 ~ 64HRC；另外在 40 ~ 70℃ 的热油中冷却，或在 240 ~ 450℃ 的硝盐中回火、水冷，硬度为 43 ~ 50HRC。在实际生产过程中应根据品种和材料的不同进行回火温度的调节，同时为了确保其机械性能，必须在无氧化和脱碳的盐浴炉、保护气氛的网带炉或振底炉的淬火→清洗→回火自动作业线上进行处理。

一般 65Mn、70、60Si2Mn 等材料的弹簧垫圈硬度为 42 ~ 50HRC；65Mn 材料制作的齿形或锯齿形锁紧垫圈、鞍形或波形弹性垫圈硬度为 40 ~ 50HRC；65Mn、60Si2Mn 钢的弹性挡圈直径在 48mm 以下时硬度为 47 ~ 54HRC，而直径为 48 ~ 200mm 时为 44 ~ 51HRC。

需要注意为防止这类零件出现质量问题，在盐浴加热时要认真脱氧，保护气氛炉内的气氛应具有还原性，对脱碳零件要先进行补碳处理等。其硬度检验在洛氏硬度计或显微硬度计上进行。

(3) 弹簧销和铆钉的热处理 销的种类很多，根据使用条件和目的的差异，选用的材料和热处理工艺规范也有较大的区别，弹簧销常用的热处理工艺为渗碳或高频感应淬火，以获得高的表面硬度，另外可采用调质中碳钢。销类材料的选用和热处理工艺规范见表 7-29。

表 7-29 销类材料的选用和热处理工艺规范

材 料			热处理工艺及要求		表 面 处 理
种类	材料牌号	标准号	硬度 HRC	热处理工艺	
碳素钢	35	GB/T 699—1999	28 ~ 38	850 ~ 860℃ 加热 水冷，550 ~ 580℃ 回火	氧化镀锌钝化 (表面需磨削的除外)
	45		38 ~ 46	820 ~ 850℃，水 冷，500 ~ 550℃ 回火	
合金钢	30CrMnSiA	GB/T 3077—1999	35 ~ 41	850 ~ 880℃ 加热 油冷，530 ~ 560℃ 回火	
铜和铜合金	H62	GB/T 4423—2007	—	—	
	HPb59-1		—	—	
	QSi3-1		—	—	
特种销	12Cr13、20Cr13	GB/T 1220—2007	—	—	
	14Cr17Ni2		—	—	
	1Cr18Ni9Ti ^①		—	—	

① GB/T 1220—2007 中取消了牌号 1Cr18Ni9Ti。

35、45 和 30CrMnSi 钢制销的热处理工艺见表 7-30。

表 7-30 35、45 和 30CrMnSi 钢制销的热处理工艺

钢号	公称直径/mm	淬火温度/℃	保温时间/min	淬火冷却介质	回火温度/℃	保温时间/min	硬度 HRC
45	< 10	810 ~ 830	10 ~ 15	5% NaCl 水溶液	420 ~ 440	45	35 ~ 40
	12	810 ~ 830	10 ~ 15	5% NaCl 水溶液	410 ~ 430	45	35 ~ 40
	16	810 ~ 830	10 ~ 15	5% NaCl 水溶液	400 ~ 420	45	35 ~ 40
	20	810 ~ 830	10 ~ 15	5% NaCl 水溶液	390 ~ 410	45	35 ~ 40
	8 ~ 20	810 ~ 830	10 ~ 15	180 ~ 220℃ 硝盐浴 2 ~ 5min	440 ~ 470 (立即回火)	15 ~ 25	30 ~ 38
35	< 16	840 ~ 860	10 ~ 15	5% NaCl 水溶液	350 ~ 370	60	35 ~ 43
30CrMnSi	10 ~ 12	830 ~ 900	10 ~ 15	油	500	60	37 ~ 42 (R_m 为 120MPa ± 10MPa)
	< 20	880 ~ 900	10 ~ 15	370℃ 硝盐浴 30min			35 ~ 40 ($R_m \geq 120\text{MPa}$)

注：在盐浴炉中加热。5% 为 NaCl 的质量分数。

铆钉用于连接汽车车架部分不可拆卸的部件，为了防止铆钉在使用过程中发生断裂，在冷锻成形后必须进行再结晶退火，然后在保护气氛热处理炉中加热，在热处理前进行球化退火，由于锻造后产生了冷作硬化，为了不至于降低铆钉的强度，恢复材料冷拔前的性能，也易于铆接，应进行再结晶退火处理。铆钉常用材料及技术要求见表 7-31。

表 7-31 铆钉常用材料及技术要求

材 料			热 处 理	表 面 处 理
种类	常见材料	标准号		
碳素钢	Q215、Q235	GB/T 700—2006	退火	无
	10、15 ML10、ML20	GB/T 699—1999 GB/T 6478—2001	退火 (冷锻产品)	无 镀锌钝化
特殊钢	06Cr19Ni10 1Cr18Ni9Ti	GB/T 1220—2007	无	无
			淬火	
铜及其合金	T2	GB/T 21652—2008	无	无
	T3			钝化
	H62		退火	无 钝化

注：1. ML10、ML20、10、15 的结晶退火工艺为 680 ~ 720℃ × 2 ~ 3h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。

2. Q215、Q235 的结晶退火工艺为 660 ~ 700℃ × 2 ~ 3h，炉冷至 550℃ 以下出炉空冷。

3. GB/T 1220—2007 中取消了牌号 1Cr18Ni9Ti。

(4) 连杆螺栓的热处理 连杆螺栓是发动机工作过程中最为关键的联接部件,与曲轴配合完成活塞的运动,使发动机获得动力,因此其性能的高低直接影响到发动机使用寿命。

1) 连杆螺栓的工作条件。连杆螺栓是紧固连杆大端及其端盖的重要部件,其工作环境十分恶劣:承受预紧轴向拉应力;由于曲轴旋转时离心力周期性变化,螺栓承受交变应力的作用;曲轴和连杆之间存在间隙;在发动机爆炸冲程中,承受较大的冲击载荷;剪切应力的作用等。螺栓的失效形式为断裂和变形,其后果一是造成气缸损坏,二是无法正常工作,引起严重的事故。通常的螺纹为 M7、M9 两种细牙螺纹,螺纹联接长度与螺纹直径相比一般很大,因此在工作过程中不易松动。

根据螺栓结构及所传递的载荷特性,其所承受的应力不是沿着螺母旋合高度均匀分布的,是等比级数递减的,如图 7-8 所示,可见应力集中在螺纹的第一、二扣上,该处是十分危险的区域。

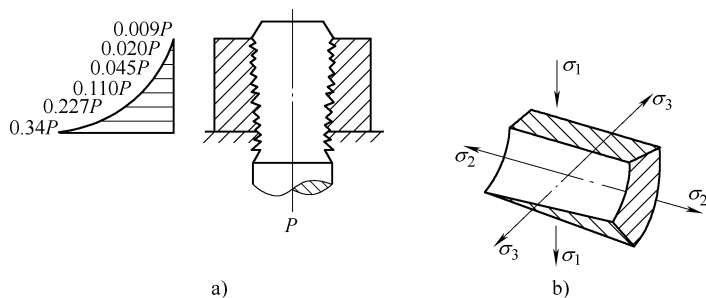


图 7-8 螺栓承受应力的分布情况

a) 具有 10 圈螺纹的螺母中螺栓螺纹间载荷分布 b) 螺栓牙沟的主应力

2) 连杆螺栓的性能与热处理要求。根据螺栓连杆的工作特点,在气温、环境变化的条件下,螺栓要具有较低的冷脆转变温度和较小的延迟破坏敏感性,确保其安全服役,螺栓要具有足够的抗拉强度和屈服强度、良好的冲击韧度、较高的疲劳强度以及一定的伸长率,只有这样才能缓冲应力集中,承受冲击载荷的作用。要求整个截面的应力大小相同,故螺栓必须完全淬透。需要注意的是连杆螺栓的受力十分复杂,特别是对用以定位的螺栓具有更高的要求,既要承受拉伸和剪切作用,又要具有良好的综合力学性能,通常采用优质合金钢制造。为防止锈蚀,连杆螺栓要进行发蓝处理。热处理后的硬度为 30~35HRC,基体组织为回火索氏体。

3) 材料选用和工艺路线分析。从螺栓的工作条件可知,它经常承受交变载荷的作用,作为连杆的螺栓通常选用韧性较高的优质碳素钢和优质合金结构钢制造,

经调质处理后即可满足连杆螺栓的技术要求。可选用 40Cr、35CrMo 等材料进行热锻或冷锻两种处理,下面以 6102 柴油机 40Cr 钢热锻连杆螺栓为例加以分析。

该螺栓的工艺流程为:下料($\phi 12.2\text{mm} \times 107\text{mm}$)→热冲六角头→退火(硬度不大于 207~170HBW)→冷勒六角头→初劈头→六角头部钻孔→热处理(调质处理,硬度为 30~35HRC)→车外圆→劈头(倒角与接触面)→平头倒角→磨中径(无心磨床)→滚压螺纹→表面发蓝处理。

4) 螺栓的热处理。其技术要求为:淬火后硬度不小于 50HRC,心部为中等大小的马氏体组织;回火后硬度为 32~38HRC,抗拉强度为 950MPa,屈服强度不小于 800MPa,伸长率不小于 10%,断面收缩率不小于 42%,冲击韧度不小于 600~700J/cm²,心部为均匀一致的回火索氏体,允许有少量的游离态的铁素体。

① 螺栓的退火处理为 680℃×3h+770℃×2h+550~580℃×2h,硬度为 170~207HBW,得到球状珠光体组织,在 860~870℃退火后得到粒状珠光体组织。

② 调质处理。要满足螺栓的技术要求,采用如下热处理工艺:在盐浴炉中或在可控气氛炉内完成热处理,加热温度为 860~870℃,使粒状珠光体转变为奥氏体组织,充分发挥碳和铬的有利作用;盐浴保温时间为 15~20min,在 20~60℃的 10~30 号机械油冷却;而回火时在 520~550℃的炉内保温 90min 后水冷,硬度为 30~35HRC。

螺栓在盐浴热处理时要一个一个地插入双层淬火板中,确保垂直吊挂。为保证安全应进行烘干和预备热处理。另外连杆用 45 钢螺母也需进行热处理,其技术要求为淬火后硬度大于 50HRC,调质处理后硬度为 26~31HRC,通常的热处理工艺为:采用亚温淬火工艺,770~790℃淬火,加热系数为 0.2~0.3min/mm,淬火冷却介质为三硝水溶液(质量分数为 25% NaNO₂+20% NaNO₃+20% KNO₃+35% H₂O,溶液的密度为 1.4~1.45g/cm³)。

采用亚温淬火有利于减少螺母的热应力,使易裂尺寸范围内的开裂倾向减小,因此有效防止了开裂。常用的方法是在 810~830℃加热,采用质量分数为 3%~7%的碱水、质量分数为 0.2%的聚乙烯水溶液油淬、水-油淬或采用 KNO₃和 NaNO₂质量分数均为 50%的盐等几种淬火冷却介质,使用这种方法时一是出现螺母淬火的开裂,二是淬火后硬度均匀性差。另外要严格控制 45 钢的碳质量分数,一般在 0.42%~0.47%范围内为宜,铬和锰的含量在要求的下限,则能有效防止在易裂尺寸 5~11mm 淬火时出现开裂。

螺栓在可控气氛炉内进行调质处理,可选用的设备为网带炉、铸链炉、料盘(料筐)推杆炉、托架炉以及悬挂式连续炉等,在保护气氛下完成表面无氧化、无脱碳热处理。

资料介绍,采用 15MnVB 钢制作的连杆螺栓经过淬火+低温回火后,出现早期的断裂,经分析发现这是由于内部的成分偏析大,该区域呈黑色状态,碳质量分数

为 0.30%，硬度高达 48 ~ 50HRC，螺栓心部硬度高导致脆性的增大，故出现了早期断裂。

实践证明，采用低碳合金钢 15MnVB 制造的连杆螺栓具有较高的强度，足够的韧性和抗疲劳性能以及较低的脆性转变温度，表 7-32 是 15MnVB 与 40Cr 连杆螺栓的性能比较。

表 7-32 15MnVB 与 40Cr 连杆螺栓的性能比较

材料	热处理工艺规范	硬度 HRC	最大拉力/10N		冲击吸收能量/10J	
			单值	平均值	单值	平均值
15MnVB	880℃ 淬火 200℃ 回火	38 ~ 41	12 750	13 715	15.8	19.0
			13 500		17.6	
			13 000		23.6	
			13 400			
40Cr	850℃ 淬火 600℃ 回火	30 ~ 33	7800	7900	17.8	18.4
			8000		17.3	
					20.3	

另外将盘式车轮装于轮毂上的紧固件为双头螺柱，它是采用铬钢或 35、45 钢制造而成的，热处理的技术要求为调质处理，硬度为 32 ~ 40HRC，回火组织为回火索氏体，其具有良好的强度和韧性，可确保螺栓的技术要求满足实际的需要。

(5) 气门调整螺栓的热处理 发动机气门调整螺栓（图 7-9）的作用是合理调节气门间隙，对其技术要求为六方顶部进行表面淬火，表面硬度为 58HRC 以上，硬化层深度为 1 ~ 3mm，选用的材料通常为 45 钢。

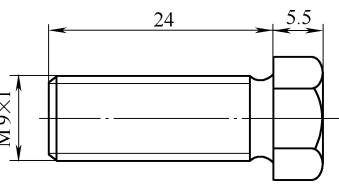


图 7-9 某种气门用调整螺栓

在气门调整螺栓的感应淬火过程中，为达到上述技术要求，可采用折线式感应器表面淬火技术进行六方的感应淬火处理。气门调整螺栓淬火用折线式感应器如图 7-10 所示，图中 1 和 2 分别为曲折导线的加热和回流线路，3 为封闭的接头，用作淬火冷却装置。其工作过程为：螺栓在感应器内向前滚动时，六方顶部得到感应加热，达到接头处时进行水冷，得到了要求的硬度和硬化层深度。同时考虑到六方的宽度为 5.5mm，因此感应器的曲折导线可增加加热面积的宽度，确保顶部加热温度的均匀化，又能够提高加热的效率和产品质量。

为了实现螺栓感应淬火的机械化和自动化生产作业，适应大批量的生产流程需要，必须有相应的配套装置。转盘式调整螺栓淬火装置如图 7-11 所示。螺栓依次插入转盘外圆周围的孔中，调整转盘的旋转速度即可控制六方顶部的高频加热时间

的长短和加热温度的高低,当螺栓达到Z部喷水冷却处,表面正好达到淬火温度,螺栓转过90°落进料箱内,完成了零件的表面淬火过程。该类淬火方法具有操作简单可靠,加热效率高,产品质量稳定等特点,因此在汽车行业得到了十分广泛的应用。

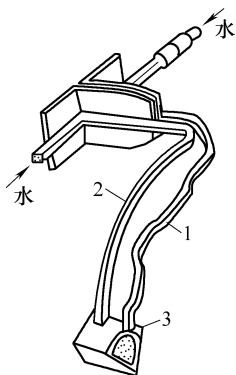


图 7-10 气门调整螺栓淬火用折线式感应器

1—曲折导线的加热线路 2—曲折导线的回流线路
3—封闭的接头

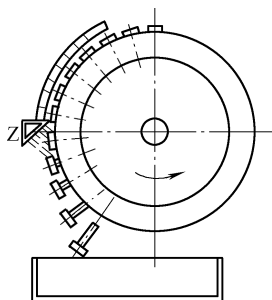


图 7-11 转盘式调整螺栓淬火装置

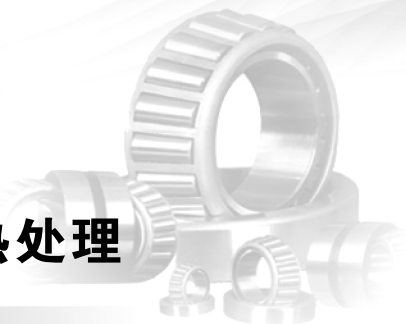
参 考 文 献

- [1] 濑户浩藏. 轴承钢 [M]. 陈洪真, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [2] 小林明. 汽车工程手册: 第三分册 [M]. 汽车工程手册编译委员会, 译. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [3] 浙江大学, 上海机械学院, 合肥工业大学. 钢铁材料及其热处理工艺 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1975.
- [4] 董铁有. 汽车构造 (发动机) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第 2 卷 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [7] 洛阳轴承厂. 滚动轴承生产 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [8] 朱元浦, 侯增寿. 金属热处理问答 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [9] 齐宝森, 陈路宾, 王忠诚, 等. 化学热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [10] 张能武. 热处理入门 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2006.
- [11] 汪浩, 宁海霞. 金属热处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [12] 赵德寅, 王大伦. 汽车零件金相分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [13] 宋涛, 顾军. 金属热处理工 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 曾祥模. 热处理炉 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.

- [15] 曹寅昌. 汽车构造 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1989.
- [16] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [18] 徐志刚. 汽车构造 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [19] 徐维新, 林鹤雄, 郭平尔. 现代汽车新技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.

第 8 章

汽车零件常用模具的热处理



8.1 概述

8.1.1 模具的作用与热处理

汽车零件用模具是十分关键的工艺装备，小到标准件、销轴的成形，大到汽车外壳的制造等，都离不开成形模具，常采用的有冲裁模、挤压模、铸造模具、锻模、冷压成形模等，其应用十分广泛，模具本身具有材料利用率高、生产成本低、易于实现自动化和机械化操作等特点，为汽车零部件的大批量生产提供了强有力的保障，模具热处理质量的好坏对汽车的制造有重要的影响。事实证明根据成形零件的材质特性、成形温度、受力状况、表面粗糙度等合理选用模具材料，并进行模具工作表面的化学处理，提高了基体的强度、热稳定性、疲劳强度、表面的耐蚀性和抗粘着性等，延长了寿命，同时也节约了钢材，降低了生产成本，提高了生产效率，汽车制造中采用的模具要满足上述要求。

资料介绍，也可根据零件的材质和硬度、成形的难易程度、冷热加工性等来合理选择模具的材料，模具热处理重要的工艺参数为加热温度和保温时间，保温时间应依据组织转变情况和得到的合金元素的固溶度为基础选取，时间过短会降低材料的热硬性和耐回火性。一般中碳合金钢加热后淬火油冷，变形要求严格的模具在 $80 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 热油中冷却。对于要求高韧性的模具，通常采用下贝氏体等温淬火处理，快冷有利于抑制碳化物的析出和出现上贝氏体，因此可提高模具的韧性和耐回火性，温度在 500°C 左右。其回火的原则为在不影响抗脆断能力及抗热疲劳性能的前提下，尽可能提高模具本身的硬度。同时根据零件的工作条件和具体的失效形式来确定具体的热处理工艺规范。

模具作为一类专用工艺装备对生产起着至关重要的作用，因此提高模具的使用

寿命是生产过程中的重要课题，采用高强韧性的模具材料进行强韧化处理或表面处理，是提高性能和延长使用寿命的有效措施和手段，因此汽车制造使用的模具材料和相对应的热处理工艺要求十分严格。

8.1.2 模具失效的形式与原因

冷作模具常见的失效形式为磨损、断裂、塑性变形与疲劳等，热作模具的失效除了冷作模具出现的磨损、断裂与变形外，更多的是冷热疲劳、塌陷和热侵蚀等，表 8-1 为日本对模具的一般失效及其原因进行分析后汇总而成的。文献指出在一些模具中，出现早期断裂破损的比例占到 60% ~ 80%，影响模具使用寿命的因素较多，除了热处理工艺和操作外，还与模具的设计、材料选择、机械加工、装配、操作（含模具的预热等）等密切相关。

8.1.3 模具材料的类别

常用模具材料可分为碳素工具钢、合金工具钢、高合金钢、高速工具钢以及硬质合金等，应根据零件的具体成形条件进行合理选择，同时考虑零件的尺寸和精度要求而定，模具的尺寸、形状复杂程度、工作条件以及失效类型等是选择模具材料的重要依据。模具的热处理技术要求应符合规定，同时要对型腔进行表面化学热处理，以提高模具的使用寿命，防止出现早期的塌陷、变形、断裂、疲劳损坏等。常见冷作模具钢的分类与主要钢种见表 8-2，常用热作模具钢的分类与钢种见表 8-3。

8.1.4 表面强化方法与真空热处理的应用

模具表面强化处理方法一般有下列三类：第一种是不改变材料表面化学成分的方法，如感应淬火、火焰淬火、电子束相变硬化、相变硬化和加工硬化等；第二种是改变表面成分的方法，如渗碳、渗氮、渗硼、渗硫、碳氮共渗、氮碳共渗、硫碳氮共渗、渗铬以及 TD 法和离子注入等；第三种是在表面形成沉积的方法，有镀金属、堆焊、电火花强化、化学气相沉积（VCD）和物理沉积（PVD）等。表 8-4 为模具采用不同的表面强化处理方法后性能的比较。

表面强化处理按目的和作用可分为两大类：

1) 表层化学成分与组织结构改变型。用以提高表面的力学性能和物化性能，如渗碳、渗氮、氮碳共渗或碳氮共渗、渗铬、渗硼等。

2) 表层物质保护型。保护基体并具有美观作用，提高模具表面的物化性能，如渗氮、渗硫、磷化、堆焊、镀铬、超硬化合物沉积、电火花表面强化等。

表 8-1 模具的失效与原因

使用前的 失效原因		使用中的失效原因																									
		材料问题					加工问题		淬火问题								回火问题				其他问题						
		耐磨性不足	韧性不足	组织偏析	表面伤痕	内部缺陷	机械加工	放电加工异常层	淬火温度高、保温时间长	加热快、加热不均匀	淬火温度低、均热不足	热处理硬度过高	热处理硬度过低	脱碳	渗碳	冷却过快	冷却不充分	冷却不均	未及时回火	回火温度高、均热时间过长	回火温度低、均热时间不足	回火不均匀	回火后放置、后处理不当	盐腐蚀	精加工、研磨不良	焊接不当	操作不合理
热处理后和 使用前的 事故	淬裂			↑	↑		↑	↑	↑	↑				↑		↑		↑	↑		↑						
	放置和使用开裂																	↑		↑	↑					↑	
	异常变形、弯曲、翘曲			↑			↑		↑	↑				↑		↑		↑	↑								
	时效变形																	↑			↑						
	斑痕、表面变粗								↑	↑									↑			↑	↑				
	锈																		↑				↑	↑			
	粘有氧化皮																		↑								
	热处理硬度过高								↑	↑					↑			↑			↑	↑					
	热处理硬度过低								↑	↑	↑			↑			↑	↑		↑		↑					
使用中的 事故	早期磨损	↑		↑					↑	↑		↑	↑		↑	↑	↑		↑		↑			↑	↑		
	粘着	↑		↑			↑		↑	↑		↑	↑			↑	↑		↑		↑						
	早期疲劳开裂	↑	↑	↑	↑		↑		↑	↑		↑	↑			↑	↑		↑	↑	↑			↑	↑	↑	
	早期热裂		↑	↑	↑			↑	↑		↑	↑		↑		↑	↑			↑	↑			↑			
	早期冲击开裂		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑			↑	↑		↑	↑		↑	↑	↑			↑	↑	↑	
	纵弯曲			↑					↑	↑			↑	↑	↑		↑	↑		↑	↑						↑

表 8-2 常见冷作模具钢的分类与主要钢种

类 别	典 型 钢 号
低淬透性冷作模具钢	T7A、T8A、T9A、T10A、T12A、8MnSi、Cr2、9Cr2、Cr06、W、GCr15、CrW5、9SiCr
低变形冷作模具钢	CrWMn、9Mn2V、9CrWMn、9Mn2V、MnCrWV、SiMnMo
高耐磨微变形冷作模具钢	Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1（D2）、Cr5Mo1V、Cr4W2MoV、Cr12Mn2SiWMoV、Cr6WV、Cr6W3Mo2.5V2.5、Cr2Mn2SiWMoV
高强度高耐磨冷作模具钢	W18Cr4V、W9Mo3Cr4V、W6Mo5Cr4V2、W12Mo3Cr4V3N
抗冲击冷作模具钢	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si、9SiCr、60Si2Mn、5CrMnMo、5CrNiMo、5SiMnMoV
高强韧性冷作模具钢	6W6Mo5Cr4V、6Cr4W3Mo2VNb（65Nb）、7Cr7Mo2V2Si（LD）、7CrSiMnMoV（CH-1）、6CrNiSiMnMoV（GD）、8Cr2MnWMoVS
高耐磨、高韧性冷作模具钢	9Cr6W3Mo2V2（GM）、Cr8MoWV3Si（ER5）
特殊用途冷作模具钢	95Cr18、90Cr18MoV、10Cr14Mo、Cr14Mo4、1Cr18Ni9Ti、53Cr21Mn9Ni4N、7Cr15Cr2Al3V2WMo

表 8-3 常用热作模具钢的分类与钢种

按用途分类	按工作温度分类	按性能分类	按合金元素总量等分类	代 表 钢 号
热锻模具钢	高韧性热作模具钢	低耐热模具钢（350 ~ 370℃）	低合金热作模具钢	5CrNiMo、5CrMnMo 4CrMnSiMoV、5Cr2NiMoVSi 45Cr2NiMoVSi、4SiMnMoV
热挤压模用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢（550 ~ 600℃）	中合金热作模具钢	4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1 4Cr5W2VSi
		高耐热模具钢（580 ~ 650℃）	高合金热作模具钢	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V 4Cr3Mo3SiV、5Cr4W5Mo2V 5Cr4Mo3SiMnVAI
压铸模具用钢	高热强热作模具钢	中耐热模具钢	中合金热作模具钢	4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi
		高耐热模具钢	高合金热作模具钢	3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V
热冲裁模用钢	高耐磨热作模具钢	低耐热模具钢	低合金热作模具钢	8Cr3

表 8-4 模具采用不同的表面强化处理方法后性能的比较

性能	镀		N-C 共渗	离子 渗氮	真空 渗氮	渗硫	渗硼	CVD TiC	PVD TiC	TD 法			超硬 合金	工模 具钢
	Cr	Ni-P								VC	NbC	Cr ₇ C ₃		
硬度	良	良	良	良	良	一般	优	优	优	优	优	优	优	标准
耐磨性	良	良	良	良	良	一般	良	优	优	优	优	良	优	标准
抗热粘 着性	良	良	良	良	良	良	良	优	优	优	优	优	优	标准
抗咬合性	良	良	良	良	良	良	良	优	优	优	优	优	优	标准
抗冲击性	一般	一般	一般	一般	一般	标准	一般	标准	标准	标准	标准	标准	一般	标准
抗剥落性	一般	一般	良	良	良	优	一般	良	良	良	良	良	—	—
抗变形 开裂	一般	一般	优	良	良	优	良	良	良	良	良	良	—	—

表面强化处理按处理的温度可分为低温、中温和高温三大类。镀铬、发蓝、磷化、低温电解渗硫等属于低温处理，温度低于 300℃；渗氮、氮碳共渗、发蓝或蒸汽处理等属于中温处理，处理温度为 450 ~ 600℃；渗铬、渗硼、渗碳、碳氮共渗、碳氮硫三元共渗、铬铝硅三元共渗、CVD 和 PVD 处理、TD 处理、电火花表面强化、堆焊等属于高温处理，处理温度大多在 750℃ 以上。

表面强化处理按原理可分为化学热处理、表面涂覆处理和表面加工强化处理，渗碳、渗氮、渗铬和渗硼以及多元共渗属于化学热处理，改变了化学成分；堆焊、镀硬铬、超硬化合物涂层属于表面涂覆处理；喷丸与火焰淬火属于表面加工强化处理，不改变化学成分。模具表面强化处理的主要方法见表 8-5，模具表面强化处理的分类见表 8-6，模具表面强化处理工艺应用及实例见表 8-7。

表 8-5 模具表面强化处理的主要方法

不改变表面化学成分的方法	改变表面化学成分的方法	表面形成覆盖层的方法
① 高频感应淬火 ② 火焰淬火 ③ 电子束相变硬化 ④ 激光淬火 ⑤ 加工硬化（如喷丸硬化等）	① 渗碳 ② 渗氮 ③ 渗硼 ④ 渗硫 ⑤ 渗金属 ⑥ 复合渗 ⑦ TD 法 ⑧ 离子注入等	① 镀金属 ② 堆焊 ③ 电火花强化 ④ 化学气相沉积（CVD） ⑤ 物理气相沉积（PVD）等

表 8-6 模具表面强化处理的分类

项 目	表面强化类型				
	表面热处理		表面处理		表面加工 强化处理
	化学热处理	表面淬火	表面化学处理	表面覆层处理	
处理方式	将模具加热到一定温度与介质起化学作用，使其表面按需要渗入一定量的元素，从而改变表层的化学成分、组织与性能	通过一定的处理方式，使表面层组织发生变化，从而获得与心部不同的组织与性能	介质与模具产生化学反应，在模具表面形成一层与基体不同的非金属或化合物	通过物理覆盖、沉积等方式，在模具表面覆盖一层与基体不同的金属或化合物	通过一定的加工方式，在模具表面产生加工硬化层
处理目的	改变表层化学成分和组织结构，以提高表面力学和物化性能	通过改变表层的结构来强化表面	利用表层物质起保护基体和增加美观程度的作用，并提高表层的物化性能	保护基体和提高表层的力学和理化性能	强化表面层，产生残留应力，消除表面缺陷，降低表面粗糙度值
对尺寸的影响	处理后基本不增大模具的尺寸（热处理变形除外）	处理后基本不增大模具的尺寸（热处理变形除外）	尺寸略有增大	尺寸有较大增大	尺寸基本上不增大
表层与基体的关系	表面层与基体分界面不明显，有一个较为平缓的过渡层	表面层与基体分界面不明显，有一个较为平缓的过渡层	分界面较为明显，基本上没有明显的过渡层	分界面较为明显，基本上没有明显的过渡层（电火花表面强化除外）	分界面较为明显，基本上没有明显的过渡层（电火花表面强化除外）
常用于模具的热处理工艺	渗碳、渗氮、氮碳共渗、碳氮共渗、渗铬、渗硼、碳氮硼三元共渗、铬铝硅三元共渗	火焰淬火、感应淬火	渗氮、渗硫、磷化	堆焊、镀硬铬、碳化钛沉积、电火花表面强化	喷丸

表 8-7 模具表面强化处理工艺应用及实例

处 理 工 艺	使 用 性 能	应 用 举 例
渗碳	提高硬度（达 62~68HRC）、耐磨性与抗疲劳性	穿孔模具、冷挤压模
渗氮	提高硬度（950HV 以上）、耐磨性、抗粘附性、热硬性、耐疲劳性及耐蚀性，周期长，表面有脆性的白亮层	冷挤压模和压铸模具
离子渗氮	可消除表面白色的脆性层，其耐磨性、耐疲劳性和变形均优于渗氮处理	挤压模
渗铬	提高表面硬度、耐磨性、抗粘附性和耐蚀性	拉深模、挤压模
渗硼	具有极好的表面硬度、耐磨性、抗粘附性、抗氧化性、热硬性和良好的耐蚀性	拉深模、挤压模
碳氮共渗	比渗碳和渗氮有更高的硬度、耐磨性、耐疲劳性和热硬性、热强性，周期短	成形模、冷挤压模、热挤压模和模架等
氮碳共渗	提高硬度（600HV 以上）、耐磨性、抗粘附性、耐蚀性和耐热疲劳性	冷挤压模、拉深模
碳氮硼三元共渗	提高硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性和耐蚀性	挤压模
镀硬铬	降低表面粗糙度值，提高表面硬度、耐磨性及耐蚀性	热挤压模、拉深模等
TiC 相沉积	减小摩擦因数，提高硬度（3800HV 以上）、耐磨性和耐蚀性	冷挤压模和拉深模等
盐浴覆层 (TD 处理)	提高硬度、耐磨性、抗粘附性、耐热疲劳性、耐蚀性及抗氧化性	挤压模
钴基合金堆焊	提高硬度、耐磨性及热硬性	挤压模、冲头芯杆针尖
电火花表面强化	提高硬度、强度、耐磨性、耐疲劳性及耐蚀性	热挤压模、冷挤压模
喷丸处理	提高硬度、强度、耐磨性、耐热疲劳性及耐蚀性	热挤压模、冲头针尖

对于要求高精度、尺寸和力学性能稳定的模具，常采用无氧化脱碳的真空热处理，经过处理的模具具有变形小、表面光洁、疲劳强度高、韧性高和使用寿命长等特点，达到了热处理后加工余量几乎为零的理想状态，可将热处理后的加工余量减少 2/3，这有助于缩短模具的生产周期，降低制造成本。

随着真空热处理技术和真空热处理设备的发展，特别是 20 世纪 90 年代以来真空热处理新工艺、新技术得到了推广与应用，从航天和国防领域率先使用真空热处理，到精密刀具和模具的热处理技术的开发，实现了热处理零件表面不氧化、不脱碳、淬火变形小、表面硬度均匀、钢的断裂韧性提高，零件的使用寿命提高数倍到几十倍，已经成为必不可少的重要技术。

真空热处理的特点如下：有脱气作用，可改善模具的韧性，模具可获得高的表面质量，模具的变形小，无公害，但会产生合金元素的挥发。

综上所述,模具的真空热处理具有防止氧化、脱碳,可进行光亮处理,能够脱气,可改善韧性等特点,需要提醒的是应注意合金元素的挥发。

目前真空热处理炉的制造技术已经成熟,制造和加工装配等工艺手段可确保设备的各项技术指标的实现,从真空油淬到真空负压淬火是第一代技术,20世纪90年代研制了高压真空气淬炉(压力达0.5~2MPa),可进行高速工具钢、高碳高合金钢、低合金工具钢等的淬火,同时国外开始进行真空硝酸盐淬火炉、真空盐水与碱水淬火炉等的制造,以满足不同材质的热处理需要,真空热处理技术具有广阔的前景。目前应用较多的真空热处理设备有真空退火炉、真空油淬淬火炉、真空高压气淬炉、真空高压气冷分级或等温淬火炉、真空正压回火炉、真空渗碳炉、真空渗氮炉、真空渗金属炉、真空烧结炉等,我国的沈阳、北京、西安、上海、广东等地的真空热处理设备制造厂家的生产技术水平已经接近或达到了国外的先进水平,为国内的钢厂、工具厂和模具厂提供了大量的真空热处理设备,提高了我国材料和零部件的整体热处理水平。

8.1.5 模具表面强化方法的选用原则

模具表面强化方法的推广与应用,在一定程度上扩大了传统材料在模具制造中的应用范围,由于模具的失效大多是从模具表面开始的,因此模具表面性能的优劣直接影响到其使用寿命与加工件的精度等。模具是由凸模与凹模及其他等部件组成的,其中关键的是直接进行零件加工的凸模与凹模,它们重要的工作部件,故对于凸、凹模的刃口,型孔及型腔表面等工作部位提出了高硬度、高耐磨性、抗咬合性和耐蚀性等要求,以达到模具设计寿命的具体目标。

模具表面与心部的性能要求不同,很难通过材料本身的特性或采用普通的整体热处理获得理想的性能,采用表面强化技术的目的是有效提高模具表面的耐磨性、抗咬合性、抗氧化性、抗热粘着性、抗冷热疲劳性等性能,同时可使模具材料内部保持原有的强韧性。将模具的热加工工艺与表面强化技术结合起来,才能充分发挥模具材料的潜力与特点,提高模具服役寿命,实践证明,表面强化处理是提高模具质量与延长其使用寿命的重要途径,因此国内外模具制造厂家一直探讨与应用表面强化处理技术,取得了良好的经济效益,同时为制造高寿命的模具奠定了基础。

选择模具材料强化方法的基本原则为:

1) 提高模具表面的耐磨性。模具通常的失效形式是磨损,是表面硬度不足造成的。模具钢的耐磨性与钢中碳化物的类型和数量有关,形成的碳化物为 $M_{23}C_6$ 等,因此即使采用高碳高铬钢仍然无法满足其性能要求,而采用气体氮碳共渗处理后耐磨性提高了2~7倍,渗硼、渗铬等耐磨性提高数倍。

2) 耐磨性与强韧性的良好匹配。这二者是相互矛盾的,一般通用的方法是首先确保获得最佳的强韧性,再通过强化方法来提高表面耐磨性。

3) 提高抗咬合能力。在拉深、挤压时会发生冷焊现象, 因此提高模具使用寿命的举措之一是降低表面的摩擦因数。

4) 改变表面的应力状态, 将表面的拉应力变为压应力。零件表面形成残留压应力, 阻碍疲劳裂纹的产生和扩展, 有利于提高模具的冲击疲劳失效抗力, 因此延长了使用寿命。

5) 提高抗氧化性和耐蚀性。模具在工作过程中均有氧化和腐蚀现象, 其自身固有的性能无法满足要求。常见模具渗氮和氮碳共渗的工艺规范见表 8-8。

表 8-8 常见模具渗氮和氮碳共渗的工艺规范

处理 方法	工 艺 规 范						
	钢材牌号	工艺				渗层深度/mm	表面硬度/HV
		阶段	温度/℃	时间/h	分解率/(%)		
气体 渗氮	3Cr2W8V	I	480 ~ 490	20 ~ 22	15 ~ 25	0.20 ~ 0.35	≥600
		II	500 ~ 530	20 ~ 24	30 ~ 50		
		III	600 ~ 620	2 ~ 3	> 70		
	Cr12MoV	I	490 ~ 500	15	15 ~ 25	0.15 ~ 0.25	≥750
		II	500 ~ 530	30	35 ~ 50		
		III	540 ~ 550	2	> 70		
	40Cr	I	470 ~ 480	10	15 ~ 25	0.20 ~ 0.28	≥480
		II	510 ~ 520	25	30 ~ 50		
		III	550 ~ 560	2	> 70		
气体氮 碳共渗	3Cr2W8V	550 ~ 570℃ × 4 ~ 6h, 通氨气 + 酒精				0.15 ~ 0.25	≥600
	Cr12MoV	540 ~ 570℃ × 4 ~ 5h, 渗氮结束后油冷				0.10 ~ 0.20	≥600
离子 渗氮	冲头 W18Cr4V	500 ~ 520℃ × 6h				提高寿命 2 ~ 4 倍	
	冷挤压模 W6Mo5Cr4V2	500 ~ 550℃ × 2h				提高寿命 1.5 倍	
	铝压铸模具 3Cr2W8V	500 ~ 520℃ × 6h				提高寿命 1.3 倍	
	拉深模 Cr12MoV	500 ~ 520℃ × 6h				提高寿命 5 倍	
	热锻模 5CrMnMo	480 ~ 500℃ × 6h				提高寿命 3 ~ 4 倍	

另外除上述常见的一般渗氮方法外, 目前有真空渗氮、高频感应加热气体渗氮、电解气相渗氮、形变渗氮、激光渗氮、盐浴渗氮、弹性振荡渗氮、磁场渗氮、预氧化快速渗氮、高压渗氮、流态床渗氮以及强韧化渗氮等众多渗氮方法, 可根据模具的具体工作条件和零件的精度要求来进行正确的选择。

为了提高模具的使用寿命, 除了进行正确的选材、合理的热处理工艺等外, 还应该提高模具表面的耐磨性和其他性能, 事实证明表面强化处理技术是提高模具质量和延长模具使用寿命的重要措施。利用表面工程技术对模具表面进行改性或涂敷

镀层，使模具整个或部分表面获得较高的力学性能和物理性能，而心部或部分仍具有良好的综合力学性能。

8.1.6 模具热处理缺陷分析与基本措施

大量失效模具的统计表明，造成模具出现早期失效的原因中，约 70% 为模具热处理不当，其中钢的表面成分失控占 40%，淬火温度过低或回火温度不当占 20%，过高的淬火加热温度而引起模具的早期失效占 10%。剩余的 30% 则是模具设计不合理、磨削不当、使用不当或选择不合适的模具造成的，因此，根据模具的使用条件，进行合理的选材与热处理仍是提高模具使用寿命的重要途径。

模具的热处理过程是其获得要求的组织与力学性能的重要工序，模具的热处理缺陷除了与热处理过程中的不良工艺与操作有关外，还与原材料、锻造工艺、预备热处理以及其他的表面硬化处理有关。模具热处理类别与缺陷的种类见表 8-9，模具热处理缺陷产生的原因见表 8-10。

表 8-9 模具热处理类别与缺陷的种类

热处理的类别		缺陷的形式
普通热处理	退火与正火	软化不充分，退火脆性，碳化物石墨化，表面氧化和脱碳，过热，过烧，网状碳化物，球化组织不良，奈状断口和石状断口，组织反常
	淬火	淬火裂纹，淬火变形，硬化不充分，淬火软点，氧化，脱碳，过热，过烧，放置裂纹，放置变形，鱼鳞状断口，表面腐蚀
	回火	回火裂纹，回火脆性，回火软化，回火变形，表面腐蚀，残留应力过大，性能不合格
	冷处理	冷处理裂纹，冷处理变形，冷处理不充分
	后续处理	磨削裂纹，磨削烧伤，磨削淬火，酸洗脆性，浸镀脆性
表面硬化处理	表面渗碳和碳氮共渗	渗碳过度，异常组织，渗碳不均匀，内部氧化，表面剥落，表面硬度不足，表面碳化物不合格，心部组织不合格，渗碳层深度不足，心部硬度不合格，表面硬度不合格，表面脱碳
	渗氮或氮碳共渗	白亮层，剥落，渗层硬度低，渗层深度不足，渗层网状或脉冲组织，变形，心部硬度低，渗层脆性，耐蚀性差，表面氧化
	表面淬火（高频感应淬火、火焰淬火等）	变形，裂纹，表面硬度过高、过低，硬度不均匀，硬化层不足，烧伤，晶粒粗化（过热），螺旋状回火带，斑疤
特种热处理	真空热处理	表面合金元素贫化，表面增碳或增氮，表面不光亮，淬火硬度低，表面晶粒长大，粘连
	气氛热处理	表面增碳或增氮，表面不光亮，氢脆，表面腐蚀，氧化，脱碳

表 8-10 模具热处理缺陷产生的原因

类 别	影 响 因 素	
非热处理原因或 先天性原因	零件的设计不合理	零件的截面尺寸变化大, 存在棱角, 表面划伤或有打印痕迹, 材料的选用不当, 零件承受的负荷过大
	材料自身的缺陷	脱碳层过厚, 非金属夹杂物超过要求, 组织偏析, 碳化物的分布不均匀, 杂质 (P、S) 含量过多, 表面折叠, 表面微裂纹、白点
热处理原因以及 未规范加工和使用	制订的热处理工艺不合理	过热, 淬火温度低, 加热不均匀, 淬火冷却时间长, 冷却不均匀, 二次淬火, 鱼鳞状断口, 渗碳, 氧化脱碳, 球化退火不良, 未及时回火
	后续机械加工不当	磨削裂纹, 磨削烧伤, 磨削淬火, 电火花加工裂纹, 酸洗
	零件的使用缺陷	安装不当, 应力过于集中, 使用的工作环境温度高, 堆焊修理不当, 过度使用而未及时更换

从表 8-9 中可知, 淬火裂纹和淬火变形是热处理过程中的致命缺陷, 除此之外, 残留应力、组织不合格、性能不合格、脆性以及其它缺陷属于第三位的缺陷。模具在热处理过程中要进行加热和冷却处理, 以获得要求的硬度、强度和良好的韧性等, 从而确保模具的使用寿命和高的疲劳强度等。常见模具热处理过程中的缺陷、产生原因和预防措施见表 8-11。

表 8-11 常见模具热处理过程中的缺陷、产生原因和预防措施

缺陷名称	产生原因	预防措施
球化组织粗大、不均匀, 有网状、带状和链状碳化物	① 锻造工艺不良, 造成组织粗大等, 如温度过高、变形量小、停锻温度高、锻后冷却慢等 ② 球化退火工艺不当, 造成组织不良或球化不良等, 如退火温度高或低、等温温度低或等温时间短等	① 改进锻造工艺参数, 进行预备热处理等 ② 制订规范的球化退火工艺, 采用双重热处理, 快速均匀地进行细化、球化退火 ③ 合理装炉, 确保炉内加热温度的均匀性 ④ 采用调质处理取代球化退火
淬火加热时过热或过烧, 淬火晶粒粗大	① 退火后组织不良 ② 加热温度高或保温时间过长 ③ 模具的截面尺寸变化大, 在薄截面或尖角处产生过热 ④ 位置放置不合理	① 制订正确的退火工艺参数 ② 严格控制加热温度和加热时间 ③ 检测和校对测温仪表 ④ 零件与电极以及零件之间保持一定的距离

(续)

缺陷名称	产生原因	预防措施
硬度低或硬度不均	① 原材料存在严重的网状碳化物 ② 表面残存退火脱碳层或加热时脱碳 ③ 热处理工艺参数制订得不合理 ④ 钢材的淬透性差 ⑤ 冷却速度慢, 或分级、等温温度高或时间短, 淬火冷却介质选用不当 ⑥ 回火不及时或没有进行回火 ⑦ 没有进行表面处理	① 使用合格的原材料 ② 清除氧化皮, 盐浴脱氧充分, 选用真空淬火或进行可控气氛淬火加热 ③ 正确制订模具的热处理淬火和回火工艺参数 ④ 选用合理的淬火冷却介质和冷却方式 ⑤ 控制淬火冷却介质的温度和冷却时间, 严格控制碱浴或硝盐浴的水分含量 ⑥ 及时回火, 进行冷处理 ⑦ 进行表面处理
脱碳	① 盐浴脱氧不良或过于老化 ② 箱式炉加热时内部保护不良 ③ 工、夹具带进大量的铁锈	① 必须认真烘干盐浴颗粒, 控制盐浴中碳酸盐的含量, 盐浴定期检验, 确保成分合格 ② 采用保护气氛加热或真空热处理 ③ 定期对有关的工艺装备进行抛丸处理
裂纹	① 原材料存在网状、链状或带状碳化物或显微裂纹 ② 机械加工应力或冷塑性变形应力过大 ③ 热处理工艺不当或操作不规范 ④ 模具形状复杂、截面厚薄不均, 产生的热应力和组织应力大 ⑤ 重新淬火时, 未进行退火或高温回火处理 ⑥ 回火不及时或回火不足, 引起内部组织转变不均, 造成应力的增大 ⑦ 淬火加热时过热或过烧 ⑧ 电火花加工的区域存在拉应力和大量的显微裂纹	① 改变锻造和球化退火工艺, 彻底消除网状、带状和链状碳化物 ② 进行去应力退火 ③ 严格执行和控制热处理工艺规范, 温度和时间符合工艺要求 ④ 采取预热、预冷的措施或使用辅助夹具, 降低产生的应力集中 ⑤ 按要求进行预备热处理, 避免出现二次淬火 ⑥ 淬火后及时回火, 并确保回火充分 ⑦ 检查控温装置, 加强温度的校验和对首件进行金相晶粒度的检查 ⑧ 严格控制加工余量, 避免表面裂纹等缺陷的出现
腐蚀	① 盐浴中碳酸盐或硫酸盐的含量过高 ② 模具和工装夹具向盐浴中带入氧化物 ③ 在 400 ~ 500℃ 硝盐浴中停留的时间长或分级冷却时产生氧化腐蚀 ④ 工件回火后未及时清洗或清洗不干净	① 严格按技术要求对盐浴成分进行检验和控制, 合格后进行正式生产 ② 避免氧化物的带入, 对工装夹具进行抛丸处理 ③ 分级淬火时严格控制冷却的温度和时间 ④ 工件应清洗干净

模具在热处理过程中产生的一些缺陷在表 8-11 中已经作了介绍,其产生的原因是比较复杂的,应根据具体的缺陷形式与特点,找出原因和提出预防措施,模具热处理缺陷是可以减少或可控的,通常而言,对于模具的主要热处理缺陷可采取如下措施与手段。

1) 根据模具的服役条件合理选择材料。对于大型或复杂模具,为获得均匀一致的硬度,应选用淬透性高的合金模具钢,对于碳化物偏析严重的模具钢应进行合理锻造并进行调质处理,对于较大或无法锻造的模具则可进行固溶双细化热处理。

2) 模具的结构设计应合理与规范,形状对称,避免截面过大悬殊,工艺孔、螺纹孔以及凹槽等布局合理。模具表面脱碳部分应提前消除,同时也应消除模具表面的锈斑等。

3) 力学性能与变形控制严格的模具应进行预备热处理,以获得良好的组织,消除机械加工残留应力,淬火前进行充分预热,确保内外温度的均匀一致性,并采取分级淬火或等温淬火处理。

4) 模具进行真空加热或保护气氛加热,如采用盐浴炉加热则应及时进行脱氧处理,淬火后清除模具表面的残盐等,采用一般电阻炉则应对模具表面进行保护(刷涂料、使用保护木炭盒等)。

5) 选用最佳的热处理工艺规范,控制加热速度和保温时间,在确保模具硬度的前提下,尽量选择冷却性能适宜的淬火冷却介质,采用分级淬火、等温淬火、预冷或亚温淬火等工艺方法,可有效控制模具的变形与开裂。

6) 合理选择模具的装炉方法(避免模具靠近电阻丝或盐浴炉电极等)和操作方法,模具淬火后应及时进行回火处理,高合金模具钢应进行多次回火处理,要进行线切割的模具在 400 ~ 500℃ 进行回火处理,可有效控制产品质量。

8.1.7 提高挤压模具使用寿命的途径与手段

1. 合理设计模具的结构,确保结构的尺寸与模具强度,避免模具的截面过分悬殊

考虑到模具的各部分要受力均匀,避免尖角,内凹壁厚相差悬殊,宽窄、薄壁截面等出现,从而有效减少应力集中,以防止热处理过程中的变形、开裂和使用过程中的脆性破裂或早期的热裂等,因此模具结构形式的设计,应着重从强度、截面变化、孔壁以及对热处理的影响进行重点考虑,从而提高模具的使用寿命;模具的设计应尽量减小变形的程度,变形程度越大则挤压力越大,而对于气门等热挤压件,需要采用热挤压与头部镦粗两道工序,应合理分配总的变形程度。

凹模应设计成预应力组合凹模,这是考虑到挤压的单位压力很大,该设计可比一般整体式凹模具有更高的寿命。

2. 合理选用锻造温度与挤压参数, 提高模具的使用寿命

变形的温度越高则金属的变形抗力越小, 较高的挤压温度会传递给挤压模, 故应考虑对模具进行冷却的问题。毛坯的均匀加热可使其内部与表面的温差最小, 同时应减少氧化皮, 以防止增大模具型腔表面的摩擦阻力, 增大挤压力, 从而降低模具表面质量。提高毛坯的挤压速度, 可使挤压力下降, 但过大的挤压速度会造成挤压件表面层受到拉应力的作用, 可能造成热挤压件的表面裂纹, 一般而言, 碳素钢和低合金钢的挤压速度为 $2 \sim 5 \text{ m/s}$ 。

3. 合理设计热挤压零件

选用低碳钢或低合金钢, 其具有较小的高温强度和高的塑性, 锻造性能良好, 可有效降低挤压力, 该类零件可在机械加工后进行热处理来提高其表面硬度。选用大的圆角半径和拔模斜度有利于金属充满模具型腔和挤压件的出模, 减小了热挤压模具的应力集中, 有利于提高模具的寿命。选用尽量大的尺寸公差, 既可确保热挤压件的成品合格率, 同时又可延长模具的使用寿命。

4. 合理选择模具材料, 不断采用改进质量的新型模具材料, 并严格执行相应的锻造工艺与热处理工艺

选用 $4\text{Cr}5\text{MoSiV}1$ 钢来代替 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢制作挤压模是比较适宜的, $4\text{Cr}5\text{MoSiV}1$ 钢的化学成分设计合理, 易于采用先进的熔炼铸造技术, 钢材的内部质量较高。 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢虽具有较高的高温强度和热稳定性, 但其存在韧性差、导热性差、疲劳强度低以及耐磨性差等缺点。 $4\text{Cr}5\text{MoSiV}1$ 钢的热处理工艺稳定, 热处理过程的操作与质量易于控制, 具有十分优良的表面处理和化学热处理性能, 即热处理后具有良好的综合力学性能, 较高的强度和良好的韧性匹配, 可抵抗模具的塑性变形、磨损以及裂纹的产生。

$3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢挤压模常出现尖角裂纹、型腔工作带磨损超差以及型腔表面出现严重麻点等现象。事实表明, $4\text{Cr}5\text{MoSiV}1$ 钢模具的使用寿命比 $3\text{Cr}2\text{W}8\text{V}$ 钢提高 $2 \sim 3$ 倍, 而且没有发现尖角裂纹, 具有耐磨性好, 型腔工作带的沟槽浅, 麻点少和表面粗糙度值低等优点。应根据模具的工作要求来选择最佳的材料, 选用优质的挤压模具材料, 采用先进的热处理工艺与表面处理方法, 确保挤压模具的强度与韧性、导热性与疲劳强度、热稳定性与抗断裂性等有机结合, 以获得高的使用寿命。

应选用合适的模具硬度, 硬度过高则造成模具发生脆性断裂和折断, 而硬度过低则模具容易产生热变形。

5. 采用先进的热处理技术与表面处理强化工艺

要调整淬火与回火工艺参数, 增加预处理、稳定化处理以及回火次数, 减少热处理内应力与变形, 消除模具的热处理开裂等致命缺陷。在热处理过程中严格控制升温 and 冷却速度, 采用真空热处理技术或可控气氛热处理技术, 避免模具加热过程中发生氧化和脱碳, 获得良好的表面清洁度和最小的热处理变形, 提高模具的疲劳

强度等。采用新型的淬火冷却介质,应用各种模具强韧化处理工艺及表面强化处理技术与新设备,渗氮、氮碳共渗、硫氮碳共渗、渗硼、渗铬以及渗金属等,物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)等技术的应用为挤压模具表面性能的改善奠定了坚实的基础,赋予了模具材料复合材料的特性。

6. 采用新型的加工技术与手段

将热加工、电火花加工和线切割加工三者有机结合起来,采用计算机辅助设计与制造,模具的制造精度和加工质量得到了提高,提高了模具工作部分的表面质量和尺寸稳定性,且成本降低,同时避免了普通机械加工过程中的磨削烧伤、表面刀痕等缺陷的产生。

7. 不断改进设备结构和条件,改善服役的环境

根据模具的挤压方案和技术要求,计算与选择相应的最佳设备及坯料的规格与供货状态,制订最佳的挤压工艺参数与减轻模具的工作载荷,对模具在使用前和使用过程中应进行必要的预热和中间退火或回火处理,目的是减少模具的内应力,延长模具的使用寿命。

8. 合理使用与维护模具,改善修模方法与修模技术,延长模具的使用寿命

挤压模具的修复是一种正常的维护与保养,制订与执行合理的使用规程,不断提高操作者的技术水平,把先进的修复方法、修复技术与表面渗氮处理有机地结合,采用大改小、废模复活和旧模翻新措施。考虑到热挤压模使用过程中往往产生微小的镢粗,使工作部分的直径有所增大,还会粘附一些氧化皮,使尺寸变大等,故应进行及时修复,以及采用近年来发展的模具重熔与锻造技术,实现模具的迅速再生,需要注意的是,由于重熔会消耗碳含量,故热处理回火时,应采用较低的回火温度(比正常回火温度低 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$),否则会造成硬度过低而影响模具的使用寿命,主要表现为模具的塑性变形、塌陷以及型腔划伤等。

热挤压模具应在使用前进行预热,预热温度为 $200\sim 350^{\circ}\text{C}$,在专门的加热炉内或炉门口进行,也可采用烘铁法等,可确保模具钢在此温度下具有较好的韧性,不会造成突然承受载荷时发生脆性断裂。

模具必须进行良好的润滑和冷却,良好的润滑不仅可提高热挤压件的表面质量,减小挤压力,也可保证模具的表面粗糙度。需要注意的是模具冷却时应力求冷却散热效果与模具的升温效果相平衡,多采用压缩空气,或在模具外部通循环水冷却。

9. 加预应力圈红装

为了提高模具的强度,减小冷挤模成形模具的凹模尺寸,压力较大的模具常采用加预应力圈红装的方法,即红套。其过程为将预应力圈加热到一定温度,使其内腔受热膨胀到一定尺寸,把待装入的凹模放入圈后急速冷却后,预应力圈将凹模抱紧,造成预压压力,提高凹模的强度。在红装的操作过程中应注意以下事项:在凹

模装入后用自来水急速喷射凹模镶件以免热量传递过快,导致凹模硬度的降低;凹模镶件必须回火后才能红装;凹模镶件和预应力圈应置于同一个基准面上,采用图 8-1 所示方法,将两者置于等高的垫铁上,然后急冷;为确保预应力圈真正起到作用,应使凹模镶件的外径 D_1 大于预应力圈内径尺寸,冷挤压两层组合凹模的径向过盈量多为 $(0.008 \sim 0.0096) D_1$,三层组合凹模的径向过盈量为 $(0.0097 \sim 0.0106) D_1$;

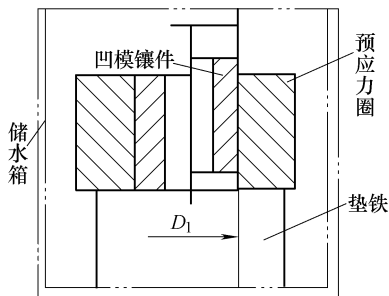


图 8-1 预应力圈的红套示意图

成形模具的红装温度为 $650 \sim 700^{\circ}\text{C}$,考虑到预应力圈的直径随着加热温度的升高而增大,当温度超过 A_{c1} 点后,将产生奥氏体相变,导致线胀系数的改变,此时内径反而收缩,因此冷挤压模预应力圈的红装温度应和预应力圈用材料所要求硬度对应的回火温度一致,这样才能使红装的强度得到保证。

8.1.8 控制模具热处理变形的措施

模具热处理的目的是获得要求的组织与性能,其主要工艺参数包括加热速度、加热温度、淬火冷却介质与冷却方法等,它们对于模具的热处理变形有重要的影响。

1. 加热速度

模具变形的原因在于任何金属在加热过程中均要膨胀,模具内外温度的不均必然会造成模具各部分膨胀的不一致,在钢的相变点以下,不均匀加热主要产生热应力,超过相变点加热不均匀,还会产生组织转变的不等时,即产生组织应力。模具的加热速度越快,则模具表面与心部的温差越大,这使得模具自身的应力增大,热处理后的变形将明显增大。

针对此问题的措施为:复杂模具在相变点以下进行预热,对于低合金钢模具进行 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 一次预热,对于高合金钢则进行二次预热 ($500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 、 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$);采用真空炉加热或采用可控气氛炉加热,可以分阶段加热来控制加热速度,缓慢加热或采用其他均衡加热方法,可明显缩小模具加热过程中的内外温差。

2. 加热温度

为达到模具要求的硬度,往往认为应提高模具的淬火加热温度,事实上这种认识比较片面,对于复杂模具而言,同样是在正常的加热温度范围内进行加热淬火,选用工艺规定的上限温度加热后的热处理变形量比下限温度加热变形量明显增大。

模具淬火变形的原因众所周知,淬火温度越高,则钢的晶粒越趋于长大,较大晶粒能使钢的淬透性增大,但造成淬火冷却时产生的应力增大,另外复杂模具大多采用中高合金钢制造,淬火温度提高后,由于其 M_s 点低 (通常在 250°C 以下),淬

火后的组织中残留有较多的残留奥氏体组织，将加大模具热处理后的变形。

在保证模具技术要求的条件下，控制加热温度的措施为：选用合理的加热温度；选用工艺规定的下限加热温度，减少冷却时的应力；采用阶段加热，以控制钢的晶粒度。

3. 淬火冷却介质和冷却方法

模具的淬火冷却介质与冷却方法对模具的变形有直接的影响，当模具冷却到 M_s 点以下时，钢发生组织转变，此时除了因冷却不一致所造成的热应力外，还有因相变的不等时性而产生的组织应力，冷却速度越快，冷却越不均匀，则淬火产生的应力越大，造成的模具变形越大。

选择淬火冷却介质和控制模具的冷却速度或方法的依据是热处理后的技术要求与性能，在确保满足的前提下，应采取的措施为：采用预冷措施，对于碳素钢和低合金钢可预冷到棱角部位发黑时（730 ~ 770℃）淬火，对于珠光体转变区过冷奥氏体稳定的钢种可预冷到700℃左右；采用分级淬火处理，可显著减少模具淬火时产生的热应力与组织应力，是减少复杂模具淬火变形的有效方法；对于一些精密复杂模具选用等温淬火处理。

4. 热处理操作

正确的热处理工艺操作是确保模具热处理质量的重要环节，模具的堵孔、捆绑、机械固定、适宜的加热方法、正确的冷却方向和在淬火冷却介质中的运动方向以及合理的回火工艺等，对减少模具的热处理变形有直接的影响。因此应当遵循其技术要求和操作规定，严格执行工艺规程及防范措施，确保模具热处理后的变形符合要求。

5. 残留奥氏体

模具钢热处理后总会残留部分奥氏体组织，这在高合金模具钢中表现最为明显，其淬火后含有大量的残留奥氏体，钢的各种组织有不同的比体积，奥氏体的比体积最小，这是高合金模具钢淬火 + 低温回火后体积缩小的主要原因，钢的各种组织的比体积按下列顺序递减：马氏体→回火索氏体→珠光体→奥氏体。

为防止残留奥氏体对模具变形的影响，在保证模具技术要求的前提下，应采取以下措施：

① 考虑模具的综合力学性能，应适当降低淬火加热温度。

② 适当提高回火温度，以减少残留奥氏体的数量。

③ 淬火后进行冷处理，可使残留奥氏体转变为马氏体，从而提高精度、硬度和耐磨性，可析出超细碳化物，从而提高韧性和耐磨性，降低内应力、稳定组织和稳定尺寸，因此冷处理可达到减少模具变形的目的，也是稳定尺寸的最佳措施，从而延长模具的使用寿命。

8.2 气门锻模与挺杆挤压模的热处理

8.2.1 气门锻模

1. 工作条件和技术要求

气门用热锻模指将热锻后呈蒜头状的气门毛坯，锻打成要求形状气门的专用模具，气门温度高达 $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，气门的始锻温度在 1000°C 左右，高温毛坯在终锻模腔成形时，一部分热量由锻模型腔快速传递给锻模，使模具温度升高到 400°C 以上，尤其是模具的型腔温度升高较快，最高可达 800°C 。随后立即采用水基石墨润滑剂喷洒在凸模与凹模的工作表面进行冷却，通过水分蒸发带走部分热量，冷却留在凸、凹模的细小石墨颗粒，起到减小金属流动摩擦阻力的作用，冷却可保持模具的硬度或减少模具硬度的降低，具有抵抗磨损的能力。但其也存在不足，模具型腔反复受热→冷却→热胀→冷缩，出现周期性循环，因此在模具表面因疲劳而形成微小的龟裂，开始是极为细小的，随着生产时间的延长，裂纹加深变大，形成最后的失效。

锻模型腔表面与炽热的金属反复接触，在成形过程中要承受冲击力和摩擦力的作用，还要承受弯曲、拉伸、压缩、挤压等周期性冲击作用，表面的应力大，工作条件恶劣，对性能的要求十分严格。在锻打过程中，模具被软化到 30HRC 以下，发生塑性变形，气门的形状和尺寸变化而报废，其失效从表面开始。因此模具应具有足够的强度和高的硬度，有良好的导热性和尺寸稳定性，具有高的断裂抗力，高的抗压强度、抗拉强度和屈服强度，良好的冲击韧度及断裂韧度，耐回火性和高温强度高，室温和高温硬度高，另外锻模要有小的热膨胀系数以及高的相变点，抗氧化性好等。采用表面强化技术可提高锻模的使用寿命，一般进行化学热处理如氮碳共渗、碳氮共渗、渗碳、硫碳氮共渗、硫氧氮共渗、渗硼、硼氮共渗、硼铝共渗和硼碳氮共渗等，气门锻模通常采用氮碳共渗。气门锻模经氮碳共渗处理后，表面获得较高的硬度（850HV 以上）、良好的耐磨性、冲击韧度高、化合物层致密，因此锻模在抗擦伤、抗咬合、抗粘着和耐蚀性方面有明显的提高。气门锻模（下模）的直径为 $100 \sim 120\text{mm}$ ，高度为 $70 \sim 90\text{mm}$ ，其结构形式如图 8-2 所示。

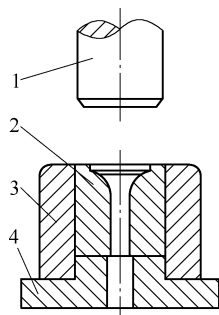


图 8-2 气门锻模结构示意图

1—上模 2—下模
3—下模套 4—下模座

2. 气门锻模材料的选用

从图 8-2 的结构可知，该模具由四部分组成，其中下模常用 3Cr2W8V、

4Cr5MoSiV1 等钢制造, 本身含有铬、钨和钒等合金碳化物形成元素, 故具有高的硬度、冲击韧度和耐热疲劳性, 同时导热性好, 因此适用于制作气门的下模。气门锻模 (或热挤压模) 用钢和硬度的具体要求见表 8-12。

表 8-12 气门锻模 (或热挤压模) 用钢和硬度的具体要求

锻模名称	材料牌号	工作硬度 HRC	锻模名称	材料牌号	工作硬度 HRC
凸模 (上模)	3Cr2W8V	46 ~ 52	凹模 (下模)	3Cr2W8V	38 ~ 45
	3Cr3Mo3W2V	46 ~ 52		3Cr3Mo3W2V	43 ~ 46
	3Cr3Mo3VNB	44 ~ 48		3Cr3Mo3VNB	43 ~ 46
	5Cr4Mo3SiMnVAI	48 ~ 52		4Cr3Mo3W4VTiNb	48 ~ 52
	5Cr4W5Mo2V	48 ~ 52		4Cr5W2VSi	43 ~ 47
	4Cr5W2VSi	43 ~ 47		4Cr5MoSiV1	43 ~ 47
	4Cr5MoSiV1	43 ~ 47			

3. 气门锻模的机械加工工艺流程

气门锻模是采用棒料加工的, 通常比较成熟的流程为: 棒料下料→锻造→退火→车加工→微机车床加工 (钻孔、车内孔)→热处理→砂磨型腔→磨加工→无损检测→磨外圆→氮碳共渗→尺寸检验→成品包装入库。需要说明的是, 凸模的加工工序比凹模少, 这里不再赘述。

(1) 锻造 这里以 3Cr2W8V 为例进行分析, 3Cr2W8V 钢属于过共析钢, 只有反复锻粗和拔长, 才能消除碳化物的偏析, 减少碳化物分布的不均匀性, 始锻温度为 1080 ~ 1120℃, 终锻温度为 850 ~ 900℃, 锻后毛坯在坑中缓冷。

(2) 预备热处理 锻造后应进行良好的球化退火处理, 目的是改善组织和降低基体的硬度, 消除内应力获得珠光体 + 球状渗碳体组织, 以利于切削加工, 为最终热处理做好组织准备, 硬度为 207 ~ 255HBW, 退火工艺为 830 ~ 850℃, 保温 4 ~ 6h, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷。气门锻模热处理后的技术要求为基体硬度 48 ~ 54HRC (包括氮碳共渗后)、型腔变形量小于 0.05mm, 表面无氧化脱碳、无磕碰伤。

另外锻模也可通过调质处理获得均匀分布的圆形的细小碳化物, 而中碳高合金钢在锻造时会出现沿晶的链状碳化物, 必须通过正火加以消除。常见气门锻模 (或热挤压模) 材料的退火工艺规范见表 8-13。

表 8-13 常见气门锻模 (或热挤压模) 材料的退火工艺规范

材料牌号	等温退火工艺参数	退火后硬度 HBW
3Cr2W8V	840 ~ 880℃ → 720 ~ 740℃, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤241
3Cr3Mo3W2V	860 ~ 880℃ → 730 ~ 750℃, 炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	197 ~ 229

(续)

材料牌号	等温退火工艺参数	退火后硬度 HBW
3Cr3Mo3VNb	830 ~ 850℃ → 700 ~ 720℃，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤187
5Cr4W5Mo2V	840 ~ 860℃ → 740 ~ 760℃，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	197 ~ 212
4Cr3Mo3W4VTiNb	840 ~ 890℃ 保温结束后，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	170 ~ 229
4Cr5W2VSi 4Cr5MoSiV1	860 ~ 880℃ → 720 ~ 740℃，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤223
4Cr5W2VSi	860 ~ 880℃ 保温结束后，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤229
5Cr4Mo3SiMnVAl	860 ~ 880℃ → 710 ~ 730℃，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤229
5Cr4W2Mo2VSi	910 ~ 930℃ → 780 ~ 800℃，炉冷至 500℃ 以下出炉空冷	≤229

4. 气门锻模最终热处理工艺

根据锻模的工作条件，其热处理的基本原则为对要求断裂强度、热疲劳性和抗热磨损性能高以及淬火后需进行加工的模具采用上限和较高的加热温度，对变形小、晶粒度细小、冲击韧度高的模具采用低限加热。

通常气门锻模的技术要求为：基体硬度 46 ~ 52HRC；表面无脱碳、无磕碰伤等。该模分上模和下模，在工作时上、下模与加热工件接触，下模型腔挤压温度达 1100 ~ 1200℃ 的工件，上模快速冲击，其受热温度往往比锤锻模要高，尤其是加工钢铁材料和难熔金属时。模具承受较大的应力，挤压比大的模具和细长的芯轴，其承受的应力更高。因此气门锻模必须有高的热稳定性、高的高温强度、良好的耐热疲劳性及较高的耐蚀性等，一般使用钨系热模具钢，含钨量越高则热稳定性越好，代表性的钢种为 3Cr2W8V。该钢中铬增加钢的淬透性，使模具有较好的抗氧化性和耐蚀性，钒细化晶粒，V₄C₃ 颗粒阻止晶粒长大，其化学成分见表 8-14。

表 8-14 气门锻模用 3Cr2W8V 钢的化学成分

材料牌号	化学成分（质量分数，%）							
	C	Si	Mn	Cr	W	V	P	S
3Cr2W8V	0.30 ~ 0.40	≤0.35	0.20 ~ 0.40	2.20 ~ 2.70	7.5 ~ 9.0	0.2 ~ 0.5	≤0.03	≤0.03

该钢的共析点 $A_{c1} = 825^{\circ}\text{C}$ ， $A_{r1} = 790^{\circ}\text{C}$ ， $A_{cm} = 1\ 100^{\circ}\text{C}$ ，马氏体点 $M_s = 380^{\circ}\text{C}$ 。

(1) 工艺路线 捆绑→一次预热→二次预热→淬火加热（盐浴）→冷却→热

水煮沸→时效处理→热水清洗→两次高温回火→硬度与变形检验。

(2) 热处理工艺曲线 3Cr2W8V 钢制气门锻模盐浴炉热处理工艺规范如图 8-3 所示。

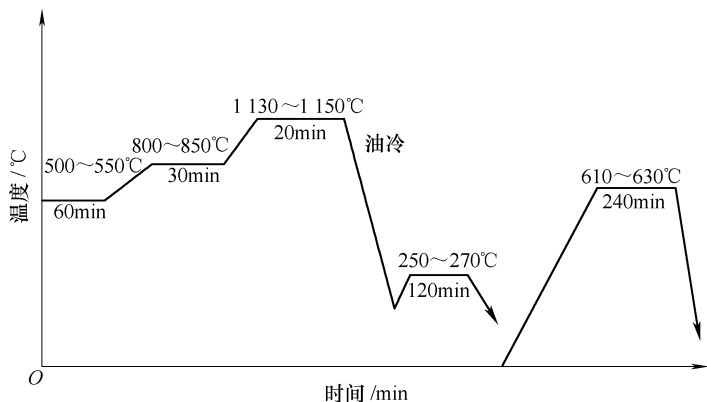


图 8-3 3Cr2W8V 钢制气门锻模盐浴炉热处理工艺规范

上模（或称为凸模）淬火处理工艺为： $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 盐浴炉预热 20min， $(1080 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 盐浴炉加热 15min，预冷后油冷，封箱后 $(570 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 加热保温两次回火，每次保温 6h，硬度为 46~52HRC。

下模（或称为凹模）热处理工艺为： $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 盐浴炉预热 20min， $(1140 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 盐浴炉加热 15min，空冷后油冷，封箱后 $(610 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 加热两次回火，每次时间为 6h，硬度为 46~52HRC。考虑到锻模本身受到强烈的冲击，对下模的热稳定性要求较高，因此要求有高的硬度和良好的耐磨性，将加热温度提高到 1140°C 左右可使碳化物充分溶解，实践证明，经过处理的锻模的使用寿命比低温处理的寿命提高 3~10 倍，目前该工艺在气门制造厂生产中得到普遍应用。

随着新型材料的研制和工艺水平的提高，目前国内已经批量生产耐热性好、强度高和耐腐蚀性好的高性能合金钢，有代表性的钢种为 4Cr3Mo3W4VNb（简称 GR 钢），它用于制作与工件接触时间长、温度较高和易于引起变形塌陷或热磨损失效的热锻模、热挤压模等，与普通的热作模具钢（如 3Cr2W8V）制作的气门热锻模相比，使用寿命得到了明显提高。

4Cr3Mo3W4VNb（GR）钢制气门锻模的盐浴热处理工艺为：淬火工艺为一次预热 $550 \sim 580^{\circ}\text{C}$ ，保温系数 $90 \sim 120\text{s/mm}$ ，二次预热 $840 \sim 860^{\circ}\text{C}$ ，保温系数 $50 \sim 60\text{s/mm}$ ；加热温度 $1180 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，保温系数 $25 \sim 30\text{s/mm}$ ；在静止的热油中冷却，油温控制在 $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围，锻模表面冷却到 200°C 左右（从油中提出表面冒青烟而不起火）提出放进 $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 的硝盐炉和空气炉中时效，可有效减少变形和开裂倾向。

回火时采用三次回火工艺：620 ~ 630℃ × 3 ~ 4h + 590 ~ 610℃ × 3 ~ 4h + 590 ~ 610℃ × 3 ~ 4h，只有在前一次工件温度冷到室温后才能进行下一次回火，回火后的整体硬度为 53 ~ 58HRC。

4Cr3Mo3W4VNb（GR）钢制气门锻模技术要求为硬度 52 ~ 56HRC，锻模表面清洁和无变形。其真空热处理工艺为：在真空炉中 600 ~ 650℃ × 50min + 840 ~ 860℃ × 40min + 1180 ~ 1200℃ × 25min，三个阶段的加热系数分别为 60 ~ 70s/mm、40 ~ 50s/mm、40 ~ 50s/mm，先充氮气后油冷至 150℃ 出油空冷，对要求以热硬性为主的采用 630℃ × 3h + 600℃ × 3h，空冷后硬度为 56 ~ 57HRC。

除 3Cr2W8V、4Cr3Mo3W4VNb（GR）等材料外，还有一些材料也可用于制作气门锻模。气门锻模常见材料的热处理工艺规范见表 8-15。

表 8-15 气门锻模常见材料的热处理工艺规范

材料牌 号	淬火加热 温度/℃	淬火冷 却介质	淬火后硬 度/HRC	回火工艺规范		
3Cr2W8V	1050 ~ 1100	油	50	① 560 ~ 580℃ × 2h × 1 次 ② 600 ~ 640℃ × 2h × 1 次	空冷 或油 冷	① 44 ~ 48HRC ② 40 ~ 44HRC
	1150 ~ 1160	油	53 ~ 55	① 600 ~ 620℃ × 1h × 2 次 ② 640 ~ 660℃ × 1h × 2 次		① 44 ~ 48HRC ② 40 ~ 44HRC
3Cr3Mo3W2V	1030 ~ 1090	油	52 ~ 55	① 650 ~ 660℃ × 2h × 2 次 ② 600 ~ 620℃ × 2h × 2 次		① 38 ~ 44HRC ② 48 ~ 52HRC
3Cr3Mo3VNb	1060 ~ 1090	油、盐水	46 ~ 48	610 ~ 630℃ × 2h × 2 次		45 ~ 47
5Cr4W5Mo2V	1130 ~ 1150	油	56 ~ 60	620 ~ 640℃ × 2h × 2 次		49 ~ 51
4Cr3Mo3W4VTiNb	1160 ~ 1200	油	55 ~ 57	620 ~ 640℃ × 2h × 2 次		50 ~ 52
4Cr5W2VSi	1000 ~ 1050	油、空气	56 ~ 58	① 580 ~ 620℃ × 2h × 2 次		① 48 ~ 52HRC
				② 520 ~ 560℃ × 2h × 2 次		② 52 ~ 56HRC

4Cr5MoSiV1（H13）钢气门锻模的真空热处理工艺路线为：汽油清洗装筐→500 ~ 550℃ × 90min 箱式炉一次预热→800 ~ 850℃ × 60min 盐浴炉二次预热→1120 ~ 1140℃ × 40min 淬火加热与充氮→淬火冷却→热水清洗→590 ~ 610℃ × 240min 二次真空高温回火→质量检验。真空炉采用原首都机械厂生产的双室卧式真空油淬炉，型号为 ZC2-100。

采用真空淬火与回火后的锻模硬度为 49 ~ 53HRC，整体呈银灰色，型腔变形量为 0.03 ~ 0.05mm，满足了尺寸要求，实践证明，经过真空炉高温处理的锻模的使用寿命比低温处理的寿命提高 3 ~ 10 倍，比盐浴处理的提高 2 ~ 3 倍。

(3) 气门锻模的氮碳共渗 气门锻模的氮碳共渗工艺为 560 ~ 575℃ × 5 ~ 7h 油冷，渗层深度为 0.10 ~ 0.15mm，硬度为 850 ~ 1000HV 0.2。经过处理的气门锻模一次使用寿命可达 1000 次以上，是未进行氮碳共渗的 2 ~ 3 倍。而采用真空炉淬火与回火后，再进行氮碳共渗的锻模一次使用寿命达到 2500 次以上。资料介绍，也可对锻模进行 S-C-N 三元共渗，采用稀土催渗三元共渗试剂的配比为（质量比） $\text{HCONH}_2:(\text{NH}_2)_2\text{CO}:\text{S}:\text{RE}=82:15.5:1.5:1.0$ ，共渗的温度和时间为 580 ~ 600℃ × 2h，结束后油冷，渗层深度为 0.065 ~ 0.070mm，硬度在 840HV 0.2 以上。

气门锻模氮碳共渗可使型腔表面抗热疲劳、抗腐蚀，气门与模具不粘连，基体的强度高，延长模具的使用寿命。

液体氮碳共渗处理后的技术要求为：渗层深 0.10 ~ 0.15mm，表面硬度 850 ~ 1000HV，型腔表面光洁、无腐蚀、无细小炸纹。

气门锻模液体氮碳共渗工艺曲线如图 8-4 所示。

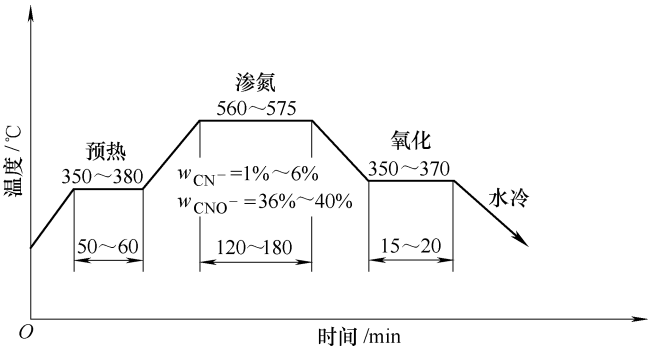


图 8-4 气门锻模液体氮碳共渗工艺曲线

表 8-16 列出了气门锻模采用三种氮碳共渗方法处理结果的比较，从表 8-16 中可以看出液体氮碳共渗的效果最佳，时间短、硬度较高、寿命长，这与氮碳共渗良好的渗层组织有关。

表 8-16 气门锻模采用三种氮碳共渗方法处理结果的比较

处 理 方 法	化 学 介 质	时 间 /h	表 面 硬 度 HV	寿 命 /件
固体氮碳共渗	木炭 + 黄血盐	10 ~ 12	600 ~ 650	300 ~ 350
气体氮碳共渗	氨气 + 酒精 + 氯化铵或尿素	6 ~ 7	650 ~ 800	450 ~ 550
液体氮碳共渗	TJ-2 氮碳共渗基盐	2	750 ~ 950	1000 ~ 1500

经金相检查，气体氮碳共渗的表面大多数部位没有白亮层，扩散层深度为 0.19 ~ 0.20mm，有三级脉状渗氮物，马氏体比较粗大；而液体氮碳共渗有明显的白亮层，厚度一般为 0.01 ~ 0.03mm，与基体结合较好，扩散层深度为 0.25mm，

有较小的脉状渗氮物。

5. 热处理工艺分析和操作要点

1) 4Cr5MoSiV1 钢气门锻模的一次预热在箱式电阻炉内进行, 由于是高合金钢, 故其导热性差, 为减少热应力的作用, 预热温度通常在 $500 \sim 550^{\circ}\text{C}$, 二次预热使用中温盐浴炉, 温度为 $840 \sim 860^{\circ}\text{C}$, 锻模要吊挂加热。

2) 最后在高温盐浴炉中加热, 上模温度为 $1070 \sim 1080^{\circ}\text{C}$, 下模温度为 $1130 \sim 1140^{\circ}\text{C}$ 。由于上模要求有高的冲击韧度, 而下模要保持高的硬度和热硬性, 故二者的加热温度有较大的差异。

3) 在静止的 L-AN10 全损耗系统用油中冷却, 应上下晃动, 待冷到 200°C 左右时出油放进时效炉内, 以防止模具的变形和开裂。

4) 上模回火温度为 $560 \sim 580^{\circ}\text{C}$, 下模回火温度为 $610 \sim 630^{\circ}\text{C}$ 。

5) H13 钢中的合金元素总量比 3Cr2W8V 钢少, 1050°C 的淬火加热温度不能发挥 H13 钢材料的性能, 通过提高淬火温度可提高奥氏体的含碳量及合金化程度, 高温回火马氏体的分解、晶粒再结晶长大和碳化物的析出聚集粗化过程将被推迟并减慢, 故确保了锻模具有更高的稳定性。

6) 考虑到锻模受到强烈的冲击, 对锻模的热稳定性要求较高, 因此要求有高的硬度和良好的耐磨性, 将 H13 钢的加热温度提高到 1140°C 左右, 使尽可能多的碳化物溶解到奥氏体中, 锻模可保持高的硬度、热硬性以及足够的强度。

7) H13 钢锻模宜采用热油进行淬火, 否则会造成冷却不充分而降低基体的硬度。容易造成热磨损与型腔塌陷, 如果基体硬度低于 35HRC, 则无法保持正常的服役需要。

6. 气门热锻模的失效与原因分析

文献指出, 气门热锻模的失效形式中表面热疲劳裂纹占 64.3%、型腔过渡处拉伤占 21%, 模体塌陷占 13.2%, 凹模开裂占 1.5%。可见热疲劳裂纹与拉伤占到 85% 以上, 需要重点关注。

1) 型腔的圆角处热磨损, 产生细小的纵向裂纹, 这是热疲劳造成的。

2) 型腔塌陷, 发生了塑性变形, 原因是表面温度高达 700°C 左右, 超过了材料的回火温度, 造成锻模基体硬度和强度降低, 同时与热处理后硬度偏低、基体强度略差有关。需要注意如采用 H13 材料, 则要注意在油中的冷却时间必须超过 15min, 否则会增大硬度的不一致性。

3) 型腔开裂是由基体硬度高或原材料的碳化物偏析造成的。

4) 由于盐浴淬火后没有及时擦干净型腔表面的残盐, 在回火过程中发生了表面腐蚀, 从而造成盐浴腐蚀麻点 (或坑)。

5) 模具型腔内部出现缩孔多半与模具毛坯锻造成形时, 未按要求进行镦粗与拔长, 造成内部共晶碳化物未打碎, 热处理过程中膨胀量存在差异有关。

6) 表面氧化脱碳是由中高温盐浴未脱氧或脱氧不彻底, 淬火时在空气中停留时间长, 或者是原有脱碳层未加工等造成的。

7. 气门锻模非正常开裂缺陷分析及防止措施

气门热锻模的正常失效形式为磨损、塌陷或冷热疲劳裂纹开裂等, 在使用过程中由于模具加工、安装、热处理以及使用不当等原因, 容易引起模芯非正常开裂, 使用中开裂的锻模如图 8-5 所示。

将开裂的气门锻模采用线切割取下裂纹部位, 如图 8-6 和图 8-7 所示, 可以看出锻模是沿径向开裂的, 经检验裂纹周围无氧化脱碳等, 金相组织无异常。



图 8-5 气门锻模开裂实物

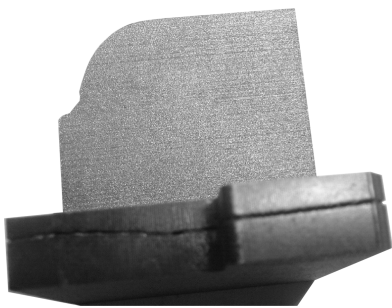


图 8-6 气门锻模开后线切割图片

采用组合式凹模可提高模具的抗开裂性能, 凹模模芯、模套间应视为紧配合情况, 二者为一整体凹模, 故其内壁的切向应力明显下降, 从而使模具的抗开裂能力大为提高。对开裂的模芯进行分析, 开裂情况之一为模具刚使用即出现模芯开裂, 原因在于模芯与模套配合间隙过大, 造成松动使模芯开裂, 此时模芯与模套圆柱面接触点不多, 模套对模芯的预压力很小或接近于零, 模芯处的切应力为处于高峰值的拉应力, 若该拉应力超过材料的抗拉强度则使模芯发生开裂。



图 8-7 气门锻模开裂后裂纹图片

开裂的另外一种情况为气门成形过程中短暂停留后, 再次锻造成形时, 出现模芯开裂。此时模具已经磨光整合, 其预压应力大为减小, 而模具在高温下连续工作, 模具受热回火软化, 表面强度低, 模具在高温高压的成形中产生的热应力、组织应力和外载荷应力叠加, 使模具的切向拉应力增大, 从而提高了模芯开裂的几率。需要高度重视的是, 锻造润滑剂在工作中冷热交

替,对于模芯造成热疲劳作用,容易产生纵向裂纹,当模具再次重新服役时,模具处于室温状态,其塑性、韧性等较低,故模具再次工作时,模芯部位会突发脆性开裂。

针对发生的非正常气门锻模开裂问题,可采用以下防范措施。

1) 合理调整模套与模芯的配合公差,使其满足过盈配合的技术要求。

2) 模具使用一定时间后应进行去应力退火处理。模具服役一定时间后,由于模具既要承受机械力又要承受温度的作用,在模具的内部发生了不均匀的塑性变形及组织变化,产生了内应力,为提高其使用寿命,服役期间进行去应力退火是十分必要的,可消除使用中积累的过大内应力。在预计的模具使用寿命的 30% 时进行第一次去应力退火,第二次则在预计模具寿命的 60% 时进行,这样可使模具的寿命延长 50% 以上。

3) 对于成形中停留后再次锻造的模具,应采用保温的措施,确保其温度不低于 300°C ,可有效防止模芯表面产生过高的拉应力造成模具的开裂,或将最后一支气门留在模芯中,起到保温的作用。

4) 在模具使用过程中,容易积累较大的热应力和组织应力,故在工作的间歇,仍进行水冷或喷水冷却,要消除这部分应力,可进行适当的保温,避免直接冷却到室温而引起模具的开裂,采用电热丝或煤气加热炉等保温,温度以控制在 $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 为宜。

对于需要提前换下或维修的模具,不能直接冷却到室温,应缓慢冷却,减小冷冲击。对于为提高模具的总寿命而进行的超前修复模具,主要对出现的不同程度的小塑性变形、微裂纹以及不均匀的磨损等进行消除。

8. 提高气门锻模使用寿命的措施与方法

气门锻模服役过程中是需要润滑与冷却的,二硫化钼的晶体结构为六方晶系的层状结构,其具有良好的润滑性是由其结构决定的,分子层间硫原子之间的结合力很弱,使原来相对滑动的两金属表面的摩擦,转化为二硫化钼分子间的相对移动,故降低了摩擦因数,起到润滑的作用,石墨、二硫化钼与聚四氟乙烯在各种挤压温度下的摩擦因数如图 8-8、图 8-9 和图 8-10 所示,可见它们在 400°C 以下呈现良好的润滑性能。文献介绍在热挤压和压铸中,二硫化钼是单独使用的,通常将其与其他耐高温的材料混合使用,常见的有二硫化钼 + 硅酸钠,使用温度在 370°C 以下,而二硫化钼与有机硅混合可使用的温度达 650°C 。

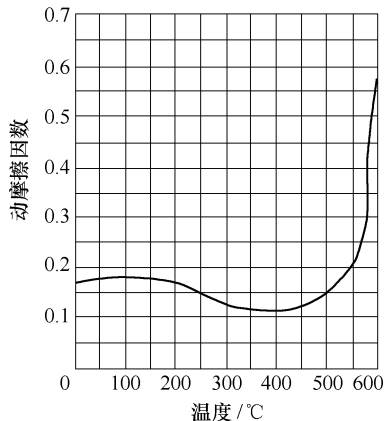


图 8-8 石墨在不同温度范围内的摩擦因数

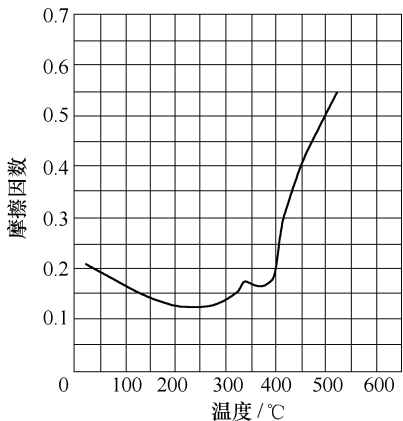


图 8-9 二硫化钼在不同温度范围内的摩擦因数

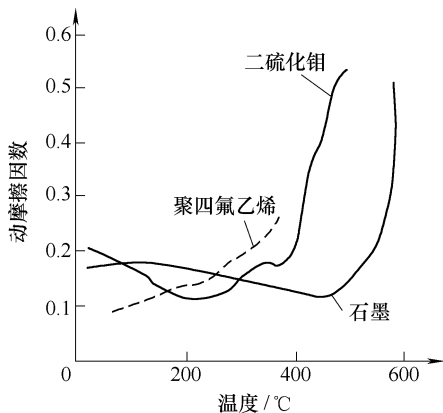


图 8-10 石墨、二硫化钼、聚四氟乙烯的摩擦因数随温度的变化

需要注意的是，润滑剂的选用应根据热挤压和压铸生产对润滑剂的要求来决定，挤压方式、挤压零件的形状、坯料的材质、挤压成形的温度、模具的材料与热处理以及润滑方式等，均有直接的影响，我国普遍以石墨型润滑剂为主。石墨润滑剂的优点为：具有层状结构，内剪切力小，可牢牢地吸附在金属的表面而形成润滑膜；具有较高的承受力，在高的压力下也不会使金属表面产生伤痕；可以和油或水配制成不同种类的润滑剂；容易从模具或挤压件上除去等。其缺点为隔热性能差，用于不锈钢或马氏体、奥氏体耐热钢零件的热挤压时，容易造成渗碳现象。

提高气门锻模使用寿命的有效措施见表 8-17。

表 8-17 提高气门锻模使用寿命的有效措施

方 法	措 施	目 的
型腔表面砂光	渗氮前气门锻模型腔表面进行砂光，去除表面的氧化层	提高抗热疲劳性能与抗磨损能力
改进锻模结构	采用预应力组合凹模结构的双层组合形式，使凹模过盈配合，型腔内壁处于切向压应力状态，与气门锻压时所产生的切向拉应力完全抵消或部分抵消	提高凹模的强度，避免凹模模芯开裂
组合凹模体内设置循环水道，喷石墨降温	通入自来水不断将热量带走，使凹模处于合适的温度范围。设计水基石墨乳喷射装置，每次模锻前采用压缩空气将水基石墨均匀喷洒在凹凸表面上	采用冷却润滑系统，显著降低了模具冷热交变幅度，提高了抗拉伤能力，降低了摩擦因数
严格控制锻件的始锻温度和锻造时间	控制适宜的始锻温度，确保模具无缺陷。始锻温度为 880 ~ 980℃，不同材质分别选择不同的加热时间	提高锻模的使用寿命

8.2.2 挺杆挤压模

1. 工作条件与技术要求

挺杆与气门配套使用,将凸轮作用于它的推力传给推杆,从而依次传递动力。因此挺杆在工作过程中,必然与凸轮反复进行高应力接触,故彼此之间存在较大的摩擦力,挺杆与凸轮相接触的端面为内球面,与凸轮的相对滑动为点接触,要承受接触应力的作用。低碳钢(20、25钢等)冷挤压挺杆(图8-11)退火后的硬度为105~125HBW,将退火、磷化、去氢和皂化后的毛坯放入凹模中,采用1600kN

压力机,通过凸模进行冷挤压成形,挺杆挤压后的温度为200~300℃,因此凸模与凹模的表面温度应在300~500℃范围内。

冷挤压凸模与凹模在工作过程中,与坯料之间产生强烈的摩擦和冲击作用,冲头或凸模在挤压过程中,承受很大的压应力,在脱模时还受到坯料对凸模的摩擦力而引起的拉应力作用,以及承受凸模偏心而造成的弯曲应力等,挤压过程中内外型腔要受到冲击和剧烈的摩擦作用,工作条件恶劣,因此冷挤压模的失效形式为磨损、塌陷、断裂、弯曲等。故要求冷挤压模具有高的硬度、良好的淬透性和耐磨性、高的热稳定性、适当的韧性与强度等,在工作过程中型腔表面能承受很大的膨胀力,摩擦因数小,通常选用的材料为Cr12、Cr12MoV、W9Mo3Cr4V高合金钢或高速工具钢等。

2. 机械加工工艺流程

该类冷挤压模具由凸模与凹模组成,二者的受力条件是一致的,凹模通常的加工流程为:下料→锻造→等温淬火→车削加工(半成形、车内孔、车锥面和端面)→热处理→磨削加工(粗磨内孔、磨内外锥面、粗磨平面)→精磨削加工→低温去应力退火→检验→磁粉检测。

凸模的加工则比较简单,下料后进行车削加工,热处理后加工到成品尺寸,随后进行低温去应力退火。

3. 凸模与凹模的热处理

凸模与凹模的工作条件是一致的,故其技术要求与热处理性能是相同的,选用的材料为Cr12MoV或W9Mo3Cr4V,其热处理技术指标为:整体硬度58~64HRC,变形量≤0.15mm,回火充分,表面无腐蚀与烧伤。

(1) Cr12MoV钢冷挤压模具的热处理工艺 其热处理工序为装夹→清洗→预热→加热→冷却→时效→清洗→回火→检验等。工艺参数为:预热箱式炉550~570℃×40min+盐浴炉840~860℃×20min+盐浴炉1020~1040℃×10~12min,在50~70℃的热油中冷却到200℃左右提出进行时效处理,最后在180~200℃的炉

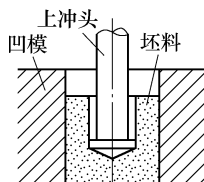


图 8-11 冷挤压挺杆示意图

中回火 3h, 至少回火 2 次。

(2) W9Mo3Cr4V 钢冷挤压模具的热处理工艺 由于高速工具钢的热导率低, 合金元素的含量高, 形成了大量的合金碳化物, 因此其热处理要经过两次或三次预热, 以缩小内外温差, 减小热应力的作用, 避免造成淬火和回火开裂。其热处理工艺为: 盐浴炉 $550 \sim 570^{\circ}\text{C} \times 40\text{min}$ + 盐浴炉 $840 \sim 860^{\circ}\text{C} \times 20\text{min}$ + 盐浴炉 $1190 \sim 1210^{\circ}\text{C} \times 6\text{min}$, 采用盐浴分级淬火 ($580 \sim 620^{\circ}\text{C}$), 空冷后清洗进行三次高温回火, 即硝盐炉 $540 \sim 560^{\circ}\text{C} \times 80\text{min} \times 3$ 次。

(3) 热处理硬度与工作条件的关系 考虑到凸模与凹模要承受复杂的应力作用, 20、25 钢退火后硬度较低, 因此凸模需要具有高的硬度和良好的韧性与基体强度, 凹模则抵抗坯料和凸模的挤压作用, 故其应有足够的硬度与强度, 因此凸模与凹模的热处理应使其较高的硬度和足够的强度, 具体表现在淬火温度偏低, 不希望合金碳化物过多溶解, 目的是保持一定数量的残留奥氏体, 有利于提高高合金工具钢或高速工具钢的韧性, 不至于出现早期断裂。分析可知高速工具钢采用 1200°C 左右的淬火温度是基于上述要求的, 因此在实际的模具热处理过程中, 不能仅仅认为只要达到高的硬度要求, 而忽略其强度、韧性等, 这样必然顾此失彼, 模具的工作条件在很大程度上决定了热处理的技术指标, 这必须引起热处理工作者和设计者的高度重视。

4. 挤压模具的热处理工艺分析与操作要点

1) 挺杆挤压凸模与凹模的工作条件比较差, 为了确保挺杆的内外表面无拉伤、毛刺, 尺寸稳定以及型腔不塌陷, 凸模不至于出现早期的失效, 采用低温淬火是比较理想的热处理方法, 目的是不使碳化物过多地溶解到基体中, 从而提高模具的冲击强度, 实践证明这种方法是很有成效的。

2) 为了避免高合金工具钢或高速工具钢淬火后存在较多的残留奥氏体 (该组织是极不稳定的), 应进行充分的回火, 这是获得技术指标的保证与前提, 进行 3 次左右的回火处理, 可确保残留奥氏体的数量降低到 8% (体积分数) 以下。

3) 挺杆采用的工艺为冷挤压, 坯料在模具型腔中是流动的, 如果坯料表面氧化脱碳, 则其直径或总体积缩小, 成形过程中容易出现同心度差和壁厚薄不均匀现象, 这样会造成模具承受的挤压应力不一致, 从而导致废品和次品的产生。对于模具的早期失效, 应从材质的选择、制造过程和加工参数、热处理工艺以及使用过程中是否采用必要的措施等方面进行分析, 绝不能片面强调某一因素, 应当进行综合评定。

4) 为了保证模具的使用寿命, 即挺杆外表面无拉伤、毛刺, 尺寸稳定, 型腔不塌陷, 采用低温淬火和低温回火的处理方法, 这样可避免钢中的碳化物过多地溶解到基体中, 从而提高模具的冲击强度等延长使用寿命。同时应当注意材料的锻打质量, 若碳化物分布不均, 则会出现严重偏析等, 这将造成在挤压过程中出现沿轴

向的内孔裂纹。

5) 模具的热处理质量检验是依据其具体的技术要求进行的, 主要进行以下各项质量检查:

- ① 硬度的检查。应符合技术要求的有关规定。
- ② 变形量的检查。对于凸模与型腔应采用磁力表座和百分表进行检查, 考虑到成形后的加工余量和尺寸的精度, 应满足不大于 0.15mm 的要求。
- ③ 表面无裂纹、内部无锻造或其他缺陷。对经过热处理或加工完毕的模具进行外观和内部质量的检查, 采用无损检测 (如磁粉检测、超声波检测、荧光检测等)。
- ④ 检查金相组织与回火程度。应无超过要求的晶粒度, 回火充分。

5. 挺杆冷挤压模具的常见缺陷分析与对策 (表 8-18)

表 8-18 挺杆冷挤压模具的常见缺陷分析与对策

缺陷名称	产生原因	对 策
凸模硬度低, 造成磨损快	① 淬火温度过低或保温时间短 ② 表面脱碳严重 ③ 回火不充分, 模具未出现二次硬化	① 严格进行温度的校验, 确保淬火温度符合要求, 保温时间应以晶粒度在要求的范围内为宜 ② 进行严格的盐浴脱氧处理, 避免表面氧化或脱碳的发生 ③ 严格执行回火工艺要求, 并进行回火后金相组织的检查
凸模变形或弯曲	① 模具的硬度低于要求, 与热处理工艺不当有关 ② 料头表面增碳, 成形坯料润滑不好或本身退火后硬度高于标准, 造成成形阻力大 ③ 模具上下不同心	① 严格执行工艺规定, 确保硬度合格, 重新审核与验证工艺的正确性 ② 采用符合要求的润滑剂, 同时检查坯料的硬度是否在要求的范围内 ③ 调整好模具的同心底
凸模硬度高、韧性差而折断	① 采用了高的淬火温度或延长了保温时间, 出现过热、晶粒度粗大现象 ② 回火温度低或保温时间短, 造成回火不充分	① 认真执行热处理工艺与技术要求, 严禁晶粒度超标 ② 进行回火程度的检查
凹模出现早期磨损	原因同凸模硬度低	对策同凸模硬度低
凹模断裂	① 坯料出现锻造裂纹, 或共晶碳化物未被击碎, 纤维方向不合格 ② 退火不充分, 热处理时淬火应力大, 未充分回火 ③ 磨削进给量大, 冷却不好而造成二次淬火	① 严格执行锻造工艺, 并进行无损检测 ② 进行退火后金相组织的检查, 并充分回火, 避免水冷或快速冷却 ③ 合理制订磨削加工量, 同时进行充分冷却处理

(续)

缺陷名称	产生原因	对策
凹模粘接	① 型腔内表面磨损而不光洁，造成表面粗糙度超差 ② 型腔受热，造成表面软化，硬度低于服役条件的要求 ③ 坯料的润滑性差，或者坯料增碳或硬度高	① 定期进行型腔表面的外观检查，对不合格的位置进行修复 ② 采用套外水冷或油冷，确保基体硬度和强度满足要求 ③ 采用良好的润滑剂，选用合格的坯料进行加工

8.3 弹簧夹头与弹簧钢板冲孔模的热处理

8.3.1 弹簧夹头

1. 工作条件和技术要求

弹簧夹头为机床重要的夹持工具，其头部要受到反复的压缩和胀开作用，要求头部夹紧处有高的耐磨性，颈部具有高的弹性强度。通过分析常见的失效方式可以知道，夹头断裂的部位大多在卡身（颈部）与卡头部的交接处，该处的硬度高低直接影响到弹簧卡头的使用寿命。图 8-12 所示为弹簧夹头的结构形式。

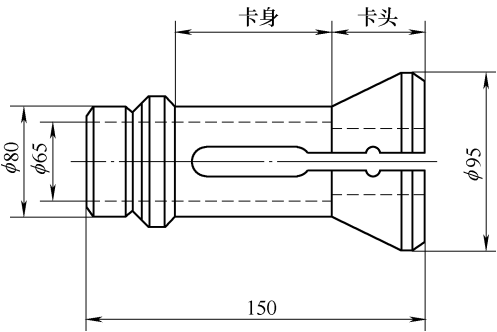


图 8-12 弹簧夹头的结构形式

2. 材料的选用

从使用的特点和技术要求而言，卡头部和卡身（颈部）的作用不同，故其硬度存在差异。能满足工作条件要求的材料有碳素工具钢（如 65、70、75、85 钢等）、低合金弹簧钢（如 65Mn、60Si2MnA 和 50CrV 等）和高合金弹簧钢（30Cr13、40Cr13 和其他耐热不锈钢等）以及部分低合金工具钢（9SiCr、GCr15 等），常用的材料为 T8A、65Mn、60Si2Mn 和 9SiCr 等，它们的碳的质量分数均在 0.60% 以上，因此既可确保头部具有高的硬度，卡身退火处理后又能具有良好的弹性，上述几类钢种均符合要求。

3. 机械加工工艺流程

弹簧夹头作为汽车零部件加工企业的常用夹具，生产的需求量很大，品种和规格因机床精度、产品大小等存在差异，但其基本的机械加工工艺路线如下：备料→

车加工（车外圆、车外锥面）→铣加工（铣槽、铣键槽）→打印标志→钻孔去尖角毛刺→热处理→磨加工（研磨两端倒角、磨外圆和锥面、磨内孔）→检验→车加工（车螺纹）→检验→无损检测。其中卡头部分的开口槽应在热处理后切开，为消除内孔的加工应力和保持尺寸的稳定，要对卡头部进行定型处理。

4. 热处理工艺

弹簧夹头热处理要求为：卡头部硬度 58 ~ 65HRC，卡身（颈部）硬度 38 ~ 45HRC，自然状态下孔径胀大 1.5 ~ 2.5mm，尾部硬度为 20 ~ 30HRC，变形量不大于 0.20mm。

考虑到弹簧夹头的整体硬度和性能要求，通常选用 9SiCr 制作弹簧卡头。可采用两种方法进行热处理。一种为整体淬火回火后，卡身（颈部）快速退火，另一种为整体硬度相同，硬度控制在 50 ~ 55HRC。

（1）普通热处理工艺 在 600 ~ 650℃ 预热，850 ~ 860℃ 加热，保温系数为 0.25 ~ 0.30min/mm，为减少变形在 160 ~ 180℃ 的硝盐浴中冷却，180 ~ 200℃ 回火 1.5 ~ 2h。将回火后的卡身部分放入 550 ~ 600℃ 的盐浴炉中快速加热，待工件的温度与盐浴温度一致时取出油冷，加热系数为 8 ~ 13s/mm，此时卡头部和卡身部的硬度符合技术要求。该工艺处理的工件在使用中容易断裂，因此很少采用，主要原因在于很难控制头颈结合处的硬度，过高则因弹性不足造成脆断，而硬度过低又会失去应有的弹性，卡头无法正常张开。

（2）特殊要求的弹簧夹头的热处理工艺 820℃ × 5 ~ 8min 淬油，160 ~ 170℃ 碱浴分级淬火，440 ~ 460℃ × 60 ~ 90min，空冷或油冷。热处理后的整体硬度为 43 ~ 48HRC，可满足要求。

（3）改进的热处理工艺 按一般要求头部和颈部硬度不同，其目的是使夹持部位耐磨，中间有良好的弹性。但在实际操作中难以控制交接处的硬度，因此常发生中段弹性不足造成断裂的情况，而因头部磨损而报废的弹簧夹头十分少见，因此整体硬度控制在 50 ~ 55HRC 既克服了上述缺点，又提高了使用寿命。弹簧夹头热处理工艺如图 8-13 所示。

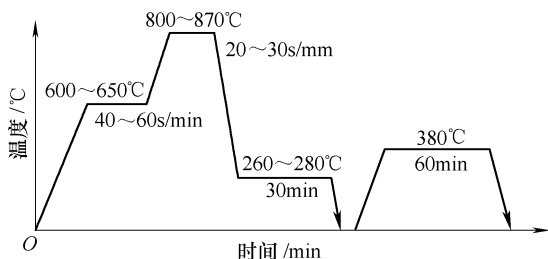


图 8-13 弹簧夹头热处理工艺

(4) 65Mn、60Si2MnA 材料弹簧夹头的热处理工艺 在实际机械加工过程中, 弹簧夹头作为必不可少的关键工艺装备作用很大。目前必须使用弹簧夹头进行工件的夹持、定位等工序, 在机床制造厂弹簧夹头作为附件也采取头部和颈部两个硬度的技术要求, 选用的材料多为弹簧钢如 65Mn、60Si2MnA 等, 应用十分广泛, 其热处理工艺的技术要求与 9SiCr 基本一致。

(5) GCr15 材料弹簧夹头的热处理工艺 采用轴承钢制造的弹簧夹头, 也广泛应用于机械加工中, 为克服其早期断裂, 采用贝氏体等温淬火, 完全可以满足使用要求。贝氏体等温淬火工艺为: 500 ~ 550℃ 箱式炉预热 + 840 ~ 850℃ 盐浴中加热, 头部加热 5min, 然后整体加热 10min, 整体在油中冷却到 200 ~ 250℃, 立即转入 280 ~ 300℃ 硝盐浴中保温 90min, 最后在 160 ~ 180℃ 硝盐浴中回火 2h。表 8-19 为 GCr15 钢制弹簧夹头不同热处理后的结果对比, 试验结果表明, GCr15 钢制弹簧夹头经过贝氏体等温淬火后的硬度比常规淬火低约 10HRC, 但使用寿命却提高了 1 ~ 1.67 倍。

表 8-19 GCr15 钢制弹簧夹头不同热处理后的结果对比

热处理工艺	淬火后硬度 HRC	回火后硬度 HRC	加工零件/件
常规淬火	58 ~ 60	55 ~ 57	1500 ~ 2000
贝氏体等温淬火	48 ~ 52	45 ~ 48	4000

(6) 定型处理 将尾部与卡身段先后浸在 800℃ 的盐浴中快速回火 (防止热量影响卡头部硬度), 尾部达到 750 ~ 800℃ 后, 将卡身立即浸入盐浴中, 保温时间按 8 ~ 10s/mm 计算, 予以弹性回火兼定型处理, 硬度应达到 38 ~ 45HRC, 尾部硬度在 20 ~ 30HRC。

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 弹簧夹头工作时需要有较高的弹性与良好的耐磨性, 必须整体淬透, 为减少变形, 淬火冷却应采用热应力较小的冷却速度, 即在热油、碱浴或硝盐浴中进行分级或等温淬火处理。

2) 也可以对弹簧夹头进行快速加热淬火, 其热处理过程如图 8-14 所示, 盐浴温度控制在 960 ~ 980℃, 卡头部分加热 12s (图 8-14a), 然后将卡身部分浸入盐浴中 90s (图 8-14b), 首先将卡头部分在盐水中冷却 6s 后, 将整体转入油中冷却, 最后在 160 ~ 180℃ 硝盐浴中回火 1.5h 后空冷至室温。在卡头部镶入胀口销后, 将卡身部分浸入 500 ~ 550℃ 低温硝盐浴中回火 1.5min (图 8-14c) 后空冷至室温。

3) GCr15 钢制弹簧夹头通过常规淬火, 获得了较高硬度和强度的马氏体, 但其塑韧性较差, 下贝氏体尽管硬度低, 但韧性很好, 故解决了因脆断而报废的问题, 如果进一步提高头部的硬度, 其使用寿命会进一步提高。考虑到 GCr15 钢淬火温度要求严格, 通常选择 840 ~ 845℃, 温度过高将使碳化物溶解过多, 会引起

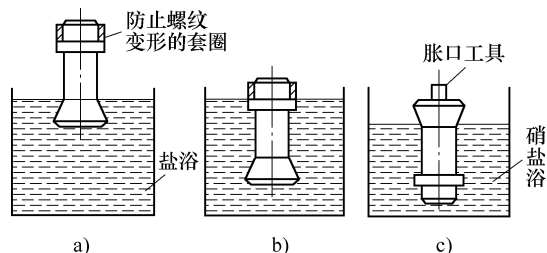


图 8-14 弹簧夹头的快速热处理过程示意图

过热而导致淬火后马氏体针粗大、综合力学性能降低、残留奥氏体数量增多、变形与氧化脱碳加剧等。

6. 弹簧夹头失效的形式与原因分析

1) 夹持部分磨损快。由于卡头部硬度低或夹持面出现表面脱碳，淬火后形成铁素体 + 托氏体组织，造成耐磨性差。

2) 头部断裂。通常发生在卡头部和卡身的交接处，如果弹簧夹头的卡身部或尾部硬度高于 47HRC，则在其反复胀大和压缩的过程中，会由于该部分硬度高，弹性较差，而发生断裂。

3) 卡身部分弹性差，开口困难。卡身部分硬度高，不符合要求。

8.3.2 弹簧钢板冲孔模

1. 工作条件与技术要求

厚度为 8 ~ 9mm、硬度为 300 ~ 350HBW 的 55SiMnVB、60Si2Mn 弹簧钢板所冲压的中心孔直径为 13mm，材料厚度大、硬度高、冲孔的直径小，超过了一般冲压件的允许范围，而模具承受的作用负荷已经超过 Cr12MoV 钢的强度极限，故是冲裁类模具中工作条件最差、使用寿命最低的一类模具，要求冲孔模具有较高的强度与高的硬度，同时具有一定的韧性与抗折断能力。其失效的主要形式为崩刃、折断和碎裂。图 8-15 所示为某汽车弹簧钢板冲孔凸模。

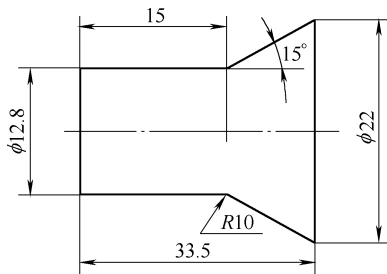


图 8-15 某汽车弹簧钢板冲孔凸模

2. 材料的选用

根据汽车弹簧钢板冲孔模的工作特点与要求，在生产中通常选择 Cr12MoV 钢作为制造汽车弹簧钢板冲孔凸模和凹模的材料，另外 Cr4W2MoV、65Nb、W6Mo5Cr4V2 等材料比 Cr12MoV 钢具有更高的强度与硬度，目前也得到了较为广泛的推广与应用。

3. 冲孔模的热处理工艺

冲孔模在冲裁过程中要受到零件的冲击和强烈磨损，同时脆性增大。Cr12MoV 钢属于高铬工具钢，热处理后内部有大量的碳化物，均匀分布在整个模具的基体上，热处理后具有耐热性和耐磨性良好、抗疲劳性能高、抗冲击性优良等特点。

(1) Cr12MoV 钢凸模的热处理工艺 Cr12MoV 钢冲孔凸模的普通热处理工艺见表 8-20。从表 8-20 中可知 Cr12MoV 钢分级淬火后进行中温回火 + 低温回火处理，可明显比普通淬火后低温回火的使用寿命提高 1 ~ 3 倍。

表 8-20 Cr12MoV 钢冲孔凸模的普通热处理工艺

序号	凸模的热处理工艺	模具的硬度 HRC	使用寿命/冲孔数	失效方式
1	1000℃油冷，220℃低温回火两次	58 ~ 60	101 ~ 207	崩刃
2	1000℃加热，260℃硝盐分级 20min，220℃回火 2h	60 ~ 61	110 ~ 647	崩刃
3	1000℃加热，260℃分级 20min，360℃中温回火 2h，220℃回火 2h	56 ~ 58	398	崩刃
4	循环加热两次后，1000℃加热，260℃硝盐分级 15min，220℃回火两次	58 ~ 59	250 ~ 626	崩刃
5	1020℃加热，260℃硝盐分级 20min，360℃中温回火 2h，220℃回火 2h	58 ~ 59	205 ~ 630	崩刃、墩粗
6	1000℃油淬 + 磨削后 360℃中温回火 2h，220℃补充回火 2h	56 ~ 57	301 ~ 620	崩刃

凸模必须进行气体或液体化学热处理，通常制作弹簧钢板的冲孔凸模所用材料为 Cr12MoV、Cr4W2MoV、65Nb 等，在热处理后进行化学热处理可明显提高凸模的使用寿命。不同表面处理工艺对 Cr12MoV、Cr4W2MoV、65Nb 钢冲孔模的影响见表 8-21。

表 8-21 不同表面处理工艺对 Cr12MoV、Cr4W2MoV、65Nb 钢冲孔模的影响

模具材料牌号	原模具寿命 /冲孔数	经表面处理后的模具寿命	
		表面处理工艺	寿命/冲孔数
Cr12MoV	265	普通气体渗氮：520℃ × 30h	340
		气体氮碳共渗：540℃ × 4h	326
		盐浴渗钒：920℃ × 4h	357
Cr4W2MoV	491	盐浴渗钒：920℃ × 4h	845
65Nb	694	气体氮碳共渗：540℃ × 4h	1100
		盐浴渗钒：920℃ × 4h，1060℃淬火，220℃回火	1378

(2) 65Nb (6Cr4W3Mo2VNb) 等钢凸模的热处理 几种弹簧钢板冲孔凸模模具材料的热处理工艺与使用寿命见表 8-22。由该表可以看出, 65Nb 钢具有最高的使用寿命。

表 8-22 几种弹簧钢板冲孔凸模模具材料的热处理工艺与使用寿命

模 具 材 料	热处理工艺	模具硬度 HRC	使用寿命/冲孔数	失 效 形 式
65Nb	1150℃ 加热, 260℃ 分级 10min, 580℃ × 2h × 2 次	56 ~ 60	800 ~ 2580	折断、崩刃、弯曲、墩粗
	1100℃ 加热, 260℃ 分级 10min, 560℃ × 2h × 2 次	57 ~ 59	951 ~ 2342	折断
Cr12MoV	1000℃ 加热, 260℃ 分级 20min, 220℃ × 2h	60 ~ 61	110 ~ 647	刃口断、崩刃
Cr4W2MoV	1000℃ 加热, 油冷, 220℃ × 2h	57 ~ 59	210 ~ 785	磨损
W6Mo5Cr4V2	1150℃ 加热, 260℃ 分级 15min, 580℃ × 2h × 2 次	57 ~ 59	381 ~ 1272	折断、崩刃
	1100℃ 加热, 260℃ 分级 15min, 560℃ × 2h × 2 次	57 ~ 59	699 ~ 720	折断、崩刃

(3) Cr4W2MoV 钢凸模的贝氏体等温淬火处理 选用 Cr4W2MoV 钢制造的冲孔凸模比 Cr12MoV (表 8-20) 具有更高的使用寿命, 从表 8-20 可以看出, 把钢板弹簧冲孔凸模的回火温度从 220℃ 提高到 360℃, 则使凸模的使用寿命提高 2 ~ 3 倍。采用等温淬火是一个有效的手段。表 8-23 为 Cr4W2MoV 钢制汽车钢板弹簧冲孔凸模的热处理工艺对比。

表 8-23 Cr4W2MoV 钢制汽车钢板弹簧冲孔凸模的热处理工艺对比

序 号	热处理工艺	凸模的硬度/HRC	使用寿命/冲孔数	失效形式
1	1000℃ 加热, 油冷, 220℃ 回火 2h × 2 次	57 ~ 59	210 ~ 785	磨损
2	1000℃ 加热, 油冷, 400℃ 回火 2h × 2 次	56 ~ 58	500 ~ 1052	折断、崩刃
3	1000℃ 加热, 260℃ 等温 4h, 220℃ 回火 2h × 2 次	56 ~ 58	130 ~ 1100	磨损
4	1020℃ 加热, 260℃ 等温 4h, 520℃ 回火 2 次, 220℃ 回火 2h × 2 次	58 ~ 59	250 ~ 1544	折断、崩刃
5	1050℃ 加热, 油冷, 520℃ 回火 2h × 2 次	59 ~ 60	475	折断

(4) 凹模的热处理工艺 常用弹簧钢板的冲孔凹模材料为 Cr12MoV, Cr12MoV 钢制凹模经不同热处理后使用寿命的对比见表 8-24, 热处理后进行氮碳共渗、盐浴渗钒等可显著提高其使用寿命。Cr12MoV 钢制弹簧钢板冲孔凹模在服役过程中, 要承受巨大的冲击力、压缩力和摩擦力以及剪切力的作用, 同时还要有足够的强度和硬度, 具有良好的耐磨性和模具尺寸的稳定性, 保持高的使用寿命。Cr12MoV 钢经热处理后硬度为 58~62HRC, 经化学热处理表面的耐蚀性、抗粘着能力提高, 也增强了刃口的强度和抗磨损性能, 因此可明显提高其使用寿命。

内孔型腔是凹模最容易出现失效的部位, 如磨损、开裂等, 因此要确保凹模具有高的使用寿命, 则必须进行适当的表面化学热处理。试验表明, 经过气体或液体氮碳共渗或盐浴渗钒后, 模具的寿命提高 3 倍以上。

表 8-24 Cr12MoV 钢制凹模经不同热处理后使用寿命的对比

热处理工艺规范	使用寿命/冲孔数
普通热处理: 850℃ 预热 + 1050℃ 加热, 260℃ 硝盐浴分级 10min, 520℃ 高温回火两次	1061
气体氮碳共渗: 520℃ × 4h	4320
盐浴渗钒: 920℃ × 4h, 1000℃ 油淬, 220℃ 回火两次	3842

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 模具的表面处理是提高重负荷冲裁模具冲头或凸模寿命的有效措施, 模具的材料不同和化学热处理工艺的差异, 决定了模具的使用寿命, 因此应正确分析模具的失效原因, 并采取可靠的手段, 从而满足模具高寿命的要求的。

2) Cr12MoV、Cr4W2MoV、65Nb、W6Mo5Cr4V2 等钢是制造弹簧钢板冲模的材料, 属于高合金钢或高速工具钢, 通过高温淬火与表面化学热处理可提高使用寿命数倍以上。

3) 为了提高凸模的韧性与抗折断能力, 避免崩裂与脆裂等, 通常采用下限的淬火温度 (低温淬火), 其晶粒度控制在 10.5~11 级。

5. 提高冲孔模具寿命的措施

对于冲孔模而言, 采用以下措施可提高模具的服役周期, 有效延长模具的使用寿命。

1) 选用合理的模具间隙, 即取料厚的 10%~15%, 过小造成模具的早期磨损, 过大则影响冲压件的质量。

2) 选用合理或最佳的使用硬度, 一般硬度高的模具比较耐磨, 但硬度超过一定的界限, 容易引起模具的崩刃或脆断, 而硬度过低则耐磨性差, 出现早期磨损而失效。

3) 选用具有良好润滑效果的润滑剂和改善润滑条件, 减少加工零件对冲压模

具的磨损，并起到降低模具温度的作用。

4) 采用强力弹性压板装置，可有效防止冲裁时坯料的滑动和降低卸料力，从而达到减少磨损的目的，同时也能提高冲压件的加工质量。

5) 采用导向套保护装置，保护细长的冲压凸模，防止因间隙不均匀而引起弯曲折断，另外可避免凸模出现早期失效。

8.4 汽车转向节锻模的热处理

1. 工作特点及技术要求

汽车转向节作为汽车传动的关键部件，在汽车行驶过程中起着十分重要的作用。转向节材质为 45 钢或 40Cr 等中碳钢，转向节锻模要承受 950℃ 以上的高温接触，加上剧烈的冲击作用，型腔表面不允许出现裂纹、塌陷等，因此锻模应具有基体硬度和热疲劳强度较高、耐腐蚀性好等特点，才能满足其反复承受冲击与成形的需要。

2. 材料的选用

根据所加工零件进行分析，需要将加热的材料在成形锻模中锻造成形，锻模一般采用 5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V、H13 等热作模具钢制造，该类材料的热稳定性较好，基体强度高，常作为锻模的主要用料。

3. 机械加工工艺流程

转向节锻模一般的机械加工路线：下料→锻造→退火→机械粗加工→超声波检测→成形加工→热处理→抛丸或喷丸→钳工修形和抛光→检验→入库。

4. 锻模的热处理

(1) 锻模的热处理特点 5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V、H13 等钢含有较多的合金元素，这些元素与碳原子结合成碳化物造成锻模的热导率低，因此在热处理过程中为确保锻模的热处理质量和具有高的使用寿命，必须遵守先预热后加热的基本原则，同时要缓慢升温，减少加热过程中的热应力，避免内外温度的过大差异。在淬火时应进行预冷，这样能避免棱边、尖角等因冷却过快而开裂的现象。

(2) 锻模的技术要求 锻模的外形尺寸为 700mm × 675mm × 400mm，体积十分庞大，其型腔与炽热的转向节毛坯接触，因此受热剧烈，容易造成早期的热疲劳损坏。锻模并非整体硬度要求相同，考虑到工作面和非工作面在模锻时的受力状况、强度的差异以及冷却情况，型腔表面硬度为 36 ~ 39HRC，而燕尾为 28 ~ 38HRC。

(3) 锻模的退火工艺 锻模是经过锻打成形的，因此在进行机械加工之前，要进行降低硬度、改善组织的退火处理，目的是便于切削加工、为最终热处理做组织准备。几种常见热作模具钢的退火工艺见表 8-25。

表 8-25 几种常见热作模具钢的退火工艺

材 质	退 火 工 艺	冷 却 方 法	硬度 HBW
5CrNiMo	780 ~ 800℃ × 4 ~ 6h	炉冷至 500℃ 出炉空冷	197 ~ 241
5CrMnMo	850 ~ 870℃ × 4 ~ 6h + 670 ~ 690℃ × 4 ~ 6h 等温退火	炉冷至 500℃ 出炉空冷	197 ~ 241
3Cr2W8V	830 ~ 850℃ × 3 ~ 5h + 710 ~ 730℃ × 4 ~ 6h 等温退火	炉冷至 400℃ 出炉空冷	207 ~ 255
5Cr4Mo3SiMnVAI	850 ~ 870℃ × 3 ~ 5h + 710 ~ 730℃ × 4 ~ 6h 等温退火	炉冷至 500℃ 出炉空冷	200 ~ 230

(4) 热处理工艺 5CrNiMo、5CrMnMo 等钢制模具在 830 ~ 860℃ 温度下完成加热过程，根据锻模的尺寸和形状，保温系数在盐浴炉和可控气氛炉中分别为 0.9 ~ 1.1min/mm、1.2 ~ 1.8min/mm。如采用箱式电阻炉则必须对模面和型腔加以保护，故采用木炭封箱加热。当然若有条件最好采用保护气氛炉或真空淬火炉加热，这样可完全消除锻模表面的氧化或脱碳质量缺陷，确保锻模表面的成分和组织不发生改变，事实表明经过处理的锻模的使用寿命和疲劳强度明显提高，资料显示锻模的寿命提高 3 ~ 5 倍。因此采用先进的热处理加热设备，不仅能提高工艺技术水平，而且能够保证产品质量。

需要注意的是，锻模在油中的冷却时间为 50 ~ 60min（表面在 200℃ 左右），立即出油空冷并及时放入 300 ~ 400℃ 的炉中回火，第二次回火要在第一次回火冷到室温后再进行，最后进行 160 ~ 180℃ 的低温回火处理，起到消除组织内部的内应力和稳定组织的作用。锻模出油温度的控制十分关键，过早或过晚均有可能造成锻模的开裂。对于实行分级淬火的，一般冷却 10 ~ 20min 确保锻模的内外温度一致后取出空冷。

5CrNiMo 钢转向节热锻模淬火、回火的工艺如图 8-16 所示，转向节热锻模加热时的保护如图 8-17 所示。经过热处理后硬度达到 36 ~ 39HRC 后，需要对要求硬度低的模具的燕尾立即进行回火处理，采用盐浴炉加热，温度为 600 ~ 650℃，图 8-18 所示为热锻模燕尾在盐浴中回火示意图，保温时间与具体尺寸的大小有关，通过模面的颜色判断保温时间，该类方法可明显提高锻模的使用寿命。要避免 300 ~ 400℃ 回火时出现第二类回火脆性，因此选择在 160 ~ 200℃ 进行低温回火。

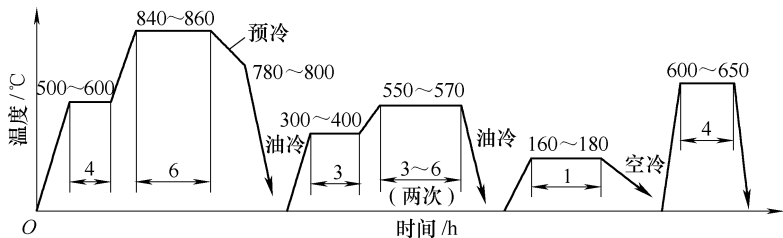


图 8-16 5CrNiMo 钢转向节热锻模淬火、回火的工艺

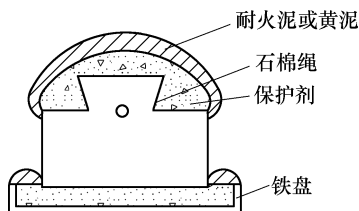


图 8-17 转向节热锻模加热时的保护

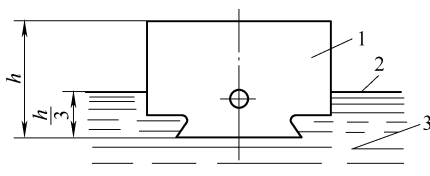


图 8-18 热锻模燕尾在盐浴中回火示意图

1—模具 2—液面 3—盐浴

5CrNiMo、5CrMnMo 等锻模的热处理工艺规范见表 8-26。

表 8-26 5CrNiMo、5CrMnMo 等锻模的热处理工艺规范

材 质	加 热 温 度/℃	回 火 温 度/℃	回火后硬度 HRC
5CrNiMo	840 ~ 860	430 ~ 450	42 ~ 47
		450 ~ 470	39 ~ 49
5CrMnMo	830 ~ 850	460 ~ 480	42 ~ 47
		490 ~ 510	39 ~ 44
		500 ~ 520	34 ~ 39
3Cr2W8V	1050 ~ 1100	一次回火 600 ~ 610 二、三次回火 580 ~ 600	50 ~ 53
5Cr4Mo3SiMnVAI	1050 ~ 1100	一次回火 590 ~ 600 二、三次回火 580 ~ 600	52 ~ 54

需要注意的是该锻模在工作过程中,要承受弯曲、压缩、挤压、摩擦磨损以及周期性的冲击作用,表面应力较大,工作条件差,因此要求锻模具有高的强度和硬度、耐磨性好,表面的耐蚀性和抗粘着性好,无型腔塌陷和塑性变形等。采用化学热处理技术,强化表面的强度和力学性能,是提高锻模质量的重要举措,事实证明,对锻模进行渗氮、氮碳共渗、硫氮碳共渗等可明显提高表面的疲劳强度和模具的使用寿命,锻造零件的产品质量得到了保证。

4. 热处理工艺分析与操作要点

1) 热作模具钢的合金碳化物较多,导热性差,同时考虑到热锻模尺寸大、形状复杂、截面的变化大等具体情况,为防止其在加热过程中出现变形和开裂,应采取预热的措施,在 600 ~ 650℃ 温度下预热后转入中温盐浴炉或可控气氛炉中加热。

2) 锻模的加热应防止氧化与脱碳,如采用箱式炉、井式炉等则应采取保护措施,因表面成分的变化将引起组织与性能的差异,在保护气氛炉中或盐浴炉中加热是最佳的方法。

3) 锻模热处理后可采用油或硝酸盐浴进行分级淬火,需要引起注意的是,油冷时为防止锻模开裂,对于 5CrNiMo、5CrMnMo 等材料的锻模,待表面油冷至 M_s 以

下（约为 200°C ）时出油冷却，此时零件表面冒青烟而不起火。

4) 根据材料的不同选择适宜的回火温度，对于高合金钢则需要进行 2~3 次回火处理，每次冷却到室温后才能进行下一次回火。

5) 锻模热处理后进行喷砂处理，清理掉表面的氧化皮等，应采用 0.8mm 以下的钢丸。

6) 选择化学热处理方法时要考虑回火温度的高低，以不影响基体的硬度为前提。

5. 提高锻模寿命的措施

锻模的失效主要表现为磨损、燕尾开裂等，因此从着手解决该问题出发，以下措施是提高模具使用寿命的有效手段，这里以 5CrMnMo 钢 3t 汽车转向节锻模为例进行分析，其工作面硬度为 $39\sim 42\text{HRC}$ ，燕尾为 $31\sim 35\text{HRC}$ 。

1) 模具的锻造应做到锻造温度符合要求并热透，采用二轻一重的锻造方式。

2) 提高模具的机械加工精度，即锻模型腔、燕尾圆角的形状与尺寸符合要求，表面粗糙度 Ra 值控制在 $12.5\mu\text{m}$ 以下，热处理后应对模具的上述重点部位进行打磨、抛光等，目的是消除可能存在的脱碳层与裂纹源。

3) 采用高温淬火的热处理工艺，锻模采用普通热处理工艺（图 8-19）使用寿命不高，而采用高温淬火热处理工艺（图 8-20）可获得板条状马氏体和下贝氏体的双相组织，具有较高的硬度、强度和最佳的强韧性配合，满足了锻模的使用条件。

4) 进行模具的碳氮共渗（图 8-21），进一步提高模具的耐磨性，减少模具的早期失效。

5) 模具工作前应进行预热，预热温度控制在 $150\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，预热可采用煤气烘烤、工频感应加热或砧块加热等方法，工作过程中要进行模具的润滑与冷却，可采用质量分数为 15% 的食盐水或湿锯末作为润滑与冷却剂。

6) 对锻模及时进行焊补、修模、抛光以及清除型腔表面的微裂纹，减少裂纹源，从而提高模具的使用寿命。采用以上综合措施后的平均寿命提高 1.5~2 倍。

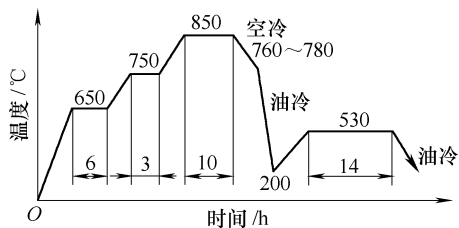


图 8-19 5CrMnMo 钢锻模普通热处理工艺

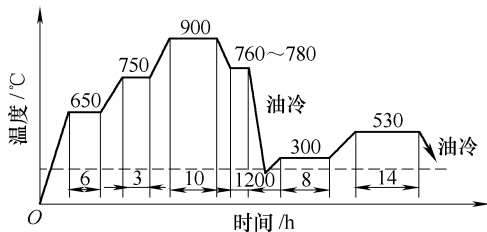


图 8-20 5CrMnMo 钢锻模的高温
淬火热处理工艺

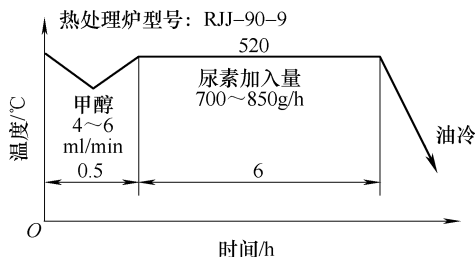


图 8-21 5CrMnMo 钢汽车转向节锻模的碳氮共渗工艺

8.5 曲轴与连杆锻模的热处理

8.5.1 曲轴锻模

1. 工作条件与技术要求

曲轴锻模是制造发动机曲轴十分重要的成形模具,曲轴常用中碳钢、中碳合金钢、非调质钢等模锻而成,也可采用球墨铸铁铸造。加热的曲轴坯料在锻模内完成塑性变形,在高温、高压下,坯料与模具型腔表面发生相对运动产生摩擦与磨损,锻模瞬间所受冲击力易使能量或应力集中到某些局部引起应力集中,造成塑性变形和断裂,模具表面的急冷急热会产生循环的热应力,使模具出现疲劳磨损与疲劳裂纹,因此,锻模的工作环境十分恶劣。曲轴锻模的失效形式有磨损、塑性变形和断裂,其中磨损与塑性变形约占 70%,断裂(裂纹)约 30%。一般而言,由于下模与高温坯料接触时间长,温度高,且氧化皮易落入下模型腔中,故下模较上模易失效。

2. 材料的选用

根据曲轴锻模的工作特点,制作模具的材料在工作温度下应具备:高的高温硬度及高温强度,高的淬透性,高的热疲劳抗力,较高的耐回火性,好的工艺性能及抗氧化性。

考虑到上述技术要求,下列牌号的热作模具钢适于制作曲轴锻模:5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo3W4VNb、H13(与 4Cr5MoSiV1 基本相当)、5Cr2NiMoVSi 等。

3. 机械加工工艺流程

这里以 5CrNiMo 钢为例介绍一般的机械加工路线:下料→锻造→退火→机械粗加工→超声波检测→成形加工→热处理→抛丸或喷丸→钳工修形和抛光→检验→入库。

4. 曲轴锻模的热处理工艺

(1) 热处理技术要求 四拐曲轴的模具尺寸为 1300mm×680mm×450mm，技术要求为型腔硬度 35～40HRC，燕尾硬度 28～33HRC。型腔与燕尾不得有氧化、脱碳和腐蚀，锻模整体不得有任何形式的裂纹等。

(2) 热处理工艺 5CrNiMo 钢热处理的各项工艺性，特别是淬透性、淬硬性、脱碳敏感性、过热敏感性和回火脆性等均很好，适于制造曲轴锻模。

5CrNiMo、5CrMnMo 曲轴锻模热处理硬度要求见表 8-27。

表 8-27 5CrNiMo、5CrMnMo 曲轴锻模热处理硬度要求

钢 号	锻 模 类 别	型腔硬度 HRC	燕尾硬度 HRC
5CrNiMo 5CrMnMo	1～2t	43～47	34～37
	3～5t	39～43	30～35
	10t	37～40	32 以下

曲轴锻模的淬火、回火是决定使用寿命的关键，由于热处理不当而导致模具过早失效占有相当大的比例，模具钢淬火与回火都有一定的温度范围，对于使用中以磨损为主要失效形式的模具，应提高钢的热硬性及耐回火性，对于在使用中以脆断为主要失效形式的模具，应通过热处理提高其强韧性。

由于曲轴锻模的体积大，通常在空气电阻炉内加热，考虑到模面不允许出现氧化和脱碳，因此需对锻模进行保护加热。同时应着重对尖角等部位缠绕石棉绳，避免加热和冷却过程中因空气和热处理应力的作用，造成模面的氧化和开裂等。采用的材料为 5CrNiMo、5CrMnMo。5CrNiMo 钢四拐曲轴锻模淬火、回火工艺曲线（箱式炉加热）如图 8-22 所示。

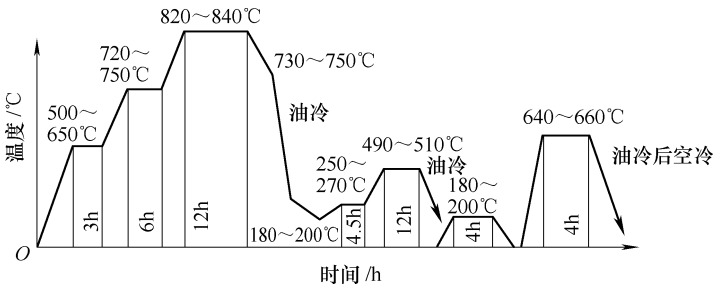


图 8-22 5CrNiMo 钢四拐曲轴锻模淬火、回火工艺曲线（箱式炉加热）

文献介绍，5Cr2NiMoVSi 钢为一种力学性能较好的模具钢，其具有良好的淬透性（比 5CrNiMo 钢心部硬度高出 10HRC），热稳定性高出 150℃，同时具有良好的

高温强度，在相同硬度下，高温强度高出 60% 以上，热疲劳性与热磨损性优于 5CrNiMo。5Cr2NiMoVSi 钢制作的曲轴锻模的使用寿命比 5CrNiMo 钢锻模提高 3.6 倍。

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 曲轴锻模体积较大，在加热时，两锻模及锻模与炉壁之间应留有 150 ~ 250mm 的距离，分阶段预热可有效预防锻模因加热不透应力过大而出现开裂。为避免燕尾部分淬火时开裂，应在圆角处缠上石棉绳，以减小该处淬火时的冷却速度。

2) 锻模淬火温度的选择应确保其钢中的晶粒不易长大，以保证有较高的冲击韧度，文献介绍，随着淬火温度的提高，锻模钢组织以板条状马氏体为主，钢中的碳化物更充分地溶解，钢的断裂韧度有所提高，耐回火性与热稳定性提高，推迟热疲劳裂纹的产生。需要进行工艺验证，以确定淬火温度。

3) 考虑到锻模体积较大，为防止模具淬火变形及开裂，锻模入油前要进行延迟冷却，为确保油温及冷却均匀，油槽内安装循环冷却装置及采用压缩空气对油进行搅拌，同时注意入油方向及适当摆动，防止形成气泡影响局部的冷却效果，导致模具型腔不完全淬火。

4) 锻模在油中冷却的表面温度为 150 ~ 200℃ 时，提出装炉回火，判定经验为：当模具提出油面只冒青烟而不着火时，或将水滴（或唾液）滴至模面有轻微的爆裂声时，表面温度即为 150 ~ 200℃。

8.5.2 连杆锻模

1. 工作条件与技术要求

汽车发动机连杆锻模的尺寸为 340mm × 180mm × 70mm（或 600mm × 500mm × 325mm），该锻模在 25t 的机械锻压机上工作，连杆的材料为 40MnB 等，其加热温度为 1050 ~ 1200℃，因此锻模的型腔要承受巨大的冲击载荷和高温的作用，同时摩擦和热疲劳的作用也十分明显，还要承受流动的炽热金属与型腔表面的摩擦，以水基石墨液来作冷却润滑介质，型腔表面被反复加热和冷却，引起不均匀的热应力和热应变，即型腔表面受到冷热交替的作用。故该热锻模具应具有较高的硬度、良好的导热性、高的冲击韧度和高温强度等，同时要求型腔表面的耐蚀性、抗粘着能力强，在冲击力作用下基体无塌陷和变形，能够在较高的温度下正常工作，连杆锻模的失效形式为锻模型腔磨损、热疲劳裂纹、塌陷和断裂等。

2. 材料的选用

根据连杆锻模的工作特点，制作模具的材料在工作温度下应具备要求的性能，从而满足加热连杆毛坯成形加工的要求。要求材料具有以下特点：较高的高温强度和硬度，耐磨性好、耐蚀性高，冲击韧度高，耐腐蚀和抗氧化，有良好的导热性。

考虑到上述技术要求,下列牌号的热作模具钢适于制作连杆锻模:5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo3W4VNb、H13等,后两种材料为新型模具钢,本身具有高的热强性、热硬性、耐磨性、抗冷热疲劳性,同时有良好的锻造和切削加工性能,从热处理产品质量的过程控制角度来看,由于合金元素增多,形成的合金碳化物均匀分布,使该材料的淬火温度范围宽、过热敏感性小、淬透性高,因此使用寿命比5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V等钢高2~6倍。

3. 机械加工工艺流程

这里以4Cr5MoSiV钢为例介绍一般的机械加工路线:下料→锻造→退火→机械加工→热处理→磨加工→电脉冲加工→精修→检验→入库。

在制造过程中,毛坯锻造成形是十分关键的一个环节,该工序将大块的碳化物和网状碳化物打碎及消除成分偏析,使成分均匀、性能稳定。

锻打后的退火是进行组织转变的重点工序,通过普通退火可细化晶粒、降低硬度、改变切削加工性,为最终的热处理做好组织上的准备等。退火工艺为830~850℃保温4~6h,炉冷至500℃出炉空冷,整体硬度 $\leq 255\text{HBW}$ 。

4. 锻模的热处理工艺

(1) 技术要求 整体硬度为39~44HRC;直线度和平面度不大于0.02mm,平行度和垂直度不大于0.05mm。碳氮共渗后进行热处理,共渗层深度应为0.5~0.8mm,型腔硬度为48~52HRC,心部硬度为43~46HRC。

(2) 4Cr5MoSiV钢汽车连杆锻模的热处理工艺(图8-23)

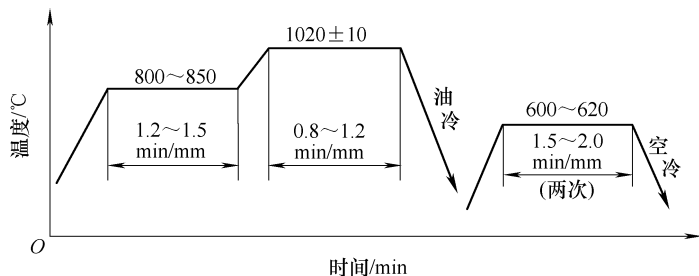


图 8-23 4Cr5MoSiV 钢汽车连杆锻模的热处理工艺 (盐浴炉加热)

4Cr5MoSiV钢制作的汽车连杆锻模,有较好的高温强度和耐热疲劳性能,处理后的硬度为39~44HRC。

(3) 5CrNiMo钢汽车连杆锻模的热处理工艺(图8-24)

(4) 5CrMnMo钢汽车连杆热锻模的热处理工艺(图8-25)

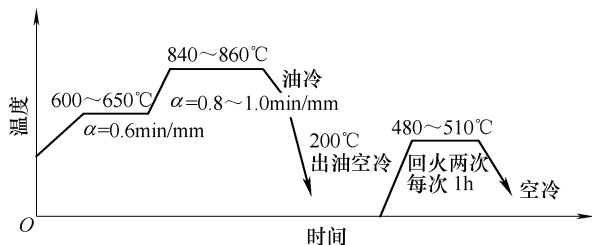


图 8-24 5CrNiMo 钢汽车连杆锻模的热处理工艺 (箱式炉加热)

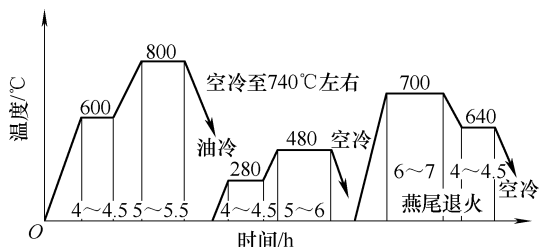


图8-25 5CrMnMo 钢汽车连杆热锻模的热处理工艺

(5) 5CrMnMo 钢汽车连杆热锻模的表面改性 为了提高热锻模的使用寿命, 对 5CrMnMo 钢连杆热锻模进行 900℃ 渗碳、870℃ 碳氮共渗、820℃ 淬火处理, 油冷至 200℃ 提出空冷, 在 50℃ 保温一定时间, 最后进行中温回火处理。

对 5CrMnMo 钢汽车连杆热锻模进行硼氮复合渗, 获得单一 Fe_2B , 由于氮的渗入, 改变了相的成分, 减小了渗层脆性, 提高了渗层断裂强度、塑性与韧性。采用 900℃ 淬火, 可得到板条状马氏体, 采用 280 ~ 300℃ 等温淬火获得下贝氏体, 再在 500℃ 回火获得 $\text{M} + \text{B}_\text{下}$ 复合组织, 经过硼氮复合渗后连杆热锻模的寿命比常规处理高 4 ~ 6 倍。表 8-28 为 5CrMnMo 钢汽车连杆热锻模不同工艺处理后的模具寿命对比。

表 8-28 5CrMnMo 钢汽车连杆热锻模不同工艺处理后的模具寿命对比

处 理 方 法	热处理工艺	失 效 形 式	使用寿命/件
常规处理	850℃ × 3.5h 淬油 + 420℃ × 4h 回火	龟裂、磨损、开裂	1000
复合等温处理	620℃ × 3h + 840℃ × 5h 淬油 + 260℃ × 6h 等温 + 460℃ × 6h 回火	磨损、龟裂、开裂	1600 ~ 1700
硼氮复合渗	580℃ × 4h 渗氮 + 900℃ × 7h 渗硼淬油 + 280℃ × 6h 等温 + 500℃ × 5h 回火	龟裂、拉毛	4000 ~ 7000

5. 热处理工艺分析与操作要点

1) 对热锻模而言, 对厚薄悬殊和有尖角的部位加以保护, 可采用缠绕石棉绳

和铁皮等方法,防止在锻模淬火时因这些部位冷却快而开裂。

2) 为防止模面在加热时氧化脱碳,一般在真空炉或可控气氛炉内加热,不具备条件的可采用箱式电阻炉木炭封箱加热,保持模具表面的原始状态,否则将严重影响锻模的使用寿命,出现早期的失效。

3) 为减少大型模具的淬火变形和防止开裂,5CrNiMo 锻模要预冷到 780℃ 左右,然后淬油冷却,200℃ 出油(冒烟而不起火)淬火后的硬度在 45HRC 以上。

4) 锻模以多次回火为宜,以消除组织转变的应力,将残留奥氏体转变为回火马氏体组织,起到稳定组织和锻模尺寸的作用。

5) 资料介绍,4Cr5MoSiV 钢与 5CrNiMo 钢制作的汽车连杆锻模的使用寿命分别为 10 000 件和 4000 ~ 5000 件,由此可知 4Cr5MoSiV 钢制造锻模的使用寿命更高。

6) 资料推荐,将材料为 5CrNiMo 钢的锻模的淬火温度自 840 ~ 860℃ 提高到 900℃,在 500℃ 回火,得到单一的板条状马氏体,可防止模具的早期脆裂,而常规工艺得到的组织为片状马氏体 + 板条状马氏体,另外进行复合处理,可提高冲击韧度和使用寿命,即 160 ~ 180℃ 分级冷却 + 280 ~ 300℃ 等温回火 2 ~ 3h。

7) 对连杆热锻模的热处理工艺进行改进,即适当提高淬火温度与采用等温淬火有利于提高连杆热锻模的韧性,局部稀土硼共渗可以明显提高热锻模的耐磨性和使用寿命。

8.5.3 H13 钢曲轴锻模与连杆锻模

曲轴锻模、连杆锻模是典型的热锻模,其工作条件十分恶劣,采用摩擦压力机进行锻造,始锻温度为 1130 ~ 1140℃,终锻温度为 850℃,模具型腔采用石墨 + 水的胶状混合物冷却并起到脱模的润滑作用,其局部温度在 500℃ 左右。由于高温曲轴、连杆锻件的反复加热、冷却以及强烈的摩擦等,使模具的型腔承受很大的冲击载荷的作用,故其主要失效形式为热疲劳和热磨损造成的型腔塌陷。

采用 H13 钢的原因在于该钢含有较多的铬、钼和钒等碳化物形成元素,碳含量较低,铬含量较高,故钢的抗氧化性、淬透性、耐热疲劳性能与韧性均较好。钼和钒形成 M_6C 和 MC 型碳化物,其溶解温度都较高,故可以细化奥氏体晶粒,回火过程中析出 M_2C 和 MC 型弥散碳化物,从而提高了二次硬化效果,提高了钢的热强性和热稳定性。文献指出,H13 钢在 550 ~ 600℃ 的高温下服役,可用冷却液等反复冷却,其热疲劳性能好,加上具有良好的强韧性,比较适合制造热锻模具。

1. 热锻模改锻后的退火处理

切取棒料后进行锻造,随后进行球化退火处理,得到了点状和球状珠光体组织,其基体硬度在 223HBW 以下,球化退火后获得细化碳化物,使碳化物带状偏析得以均匀化,便于进行切削加工和为最终的热处理做好组织准备。H13 钢热锻模

的锻后等温球化退火工艺如图 8-26 所示。

2. 热锻模的最终热处理

对加工完毕的热锻模进行热处理, 以获得所需要的设计性能, 包括耐磨性、疲劳抗力、耐蚀性、热稳定性等, 由于该模具在高温下服役, 故进行高温淬火 + 高温回火处理, 目的是确保在高温下模具可正常工作, 而不会造成模具的早期失效。

在 850℃ 左右进行充分预热, 最后在 1060℃ 的高温加热, 目的是使碳化物溶解到奥氏体中, 油冷淬火后, 进行两次 590℃ 的高温回火 + 一次低温去应力回火, 获得了回火托氏体 + 回火索氏体 + 碳化物等组织, 硬度为 49 ~ 52HRC。为避免高温回火时出现贝氏体脆性, 故选择了油冷淬火处理。考虑到回火二次硬化后硬度虽高, 但韧性差, 故选择了 590℃ 的高温回火, 有效避开了回火二次硬化温度区间, 回火时没有明显的硬化现象, 同时也赋予了模具最佳的强韧性配合。

通过等温球化退火的预备热处理工艺来细化碳化物, 并均匀带状组织, 在进行中温预热和高温加热、油淬以及三次回火后, 模具有高的热强性和韧性, 充分满足了热锻模服役条件的需要。

事实表明, 该热处理工艺使热锻模既有足够的热强性, 又有较高的韧性, 故其抗热疲劳性能较好。H13 钢曲轴锻模、连杆锻模热处理后的主要性能指标见表 8-29, 其热处理工艺如图 8-27 所示。

表 8-29 H13 钢曲轴锻模、连杆锻模热处理后的主要性能指标

冲击韧度和断裂韧度		室温拉伸性能	
冲击韧度 $a_K/(J/cm^2)$	断裂韧度 $K_{IC}/MPa \cdot m^{1/2}$	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa
35.0	68.0	1310	1470

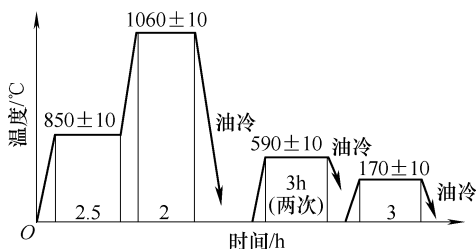


图 8-27 H13 钢热锻模的热处理工艺

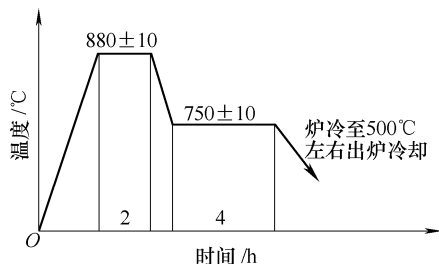


图 8-26 H13 钢热锻模的锻后等温球化退火工艺

8.6 凸轮轴锻模的热处理

1. 工作条件与技术要求

EQ140 汽车发动机凸轮轴锻模的尺寸为 $950\text{mm} \times 200\text{mm} \times 160\text{mm}$ ，其尺寸公差和几何公差、表面粗糙度和加工精度均有较高的要求，在工作中受到高温、高压和高冲击负荷的作用，模具型腔与高温金属坯料相接触产生强烈的摩擦，使模具温度高达 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ，锻件取出后模具型腔还要用水、油或压缩空气等冷却，如此反复加热、冷却，使模具表面产生较大的热应力。模具的失效方式主要为：在交变的热应力作用下，表面产生网状或放射状的热疲劳裂纹；型腔磨损或严重偏载、工艺性裂纹导致的模具开裂。因此模具应具有较高的高温强度和韧性，良好的耐磨性和耐疲劳性，抗粘着性好，同时由于模具尺寸较大，要求模具用钢具有高的淬透性。

凸轮轴的材料通常为中碳钢如 45 钢，加热温度为 $1220 \sim 1240^{\circ}\text{C}$ ，在 40MN 机械压力机上模锻而成，因此要选用热作模具钢制造锻模，例如 5CrNiMo、5CrMnMo、4CrMnSiMoV、4Cr5MoSiV、5Cr2NiMoVSi、4Cr5MoSiV1 等。

2. 机械加工工艺流程

锻模的机械制造工艺流程为：下料→加热模锻→退火→机械加工→热处理→机械加工→仿形铣→加工型槽→修磨→检验入库。

3. 凸轮轴锻模的热处理工艺

(1) 热处理技术要求 热处理后硬度为 $37 \sim 41\text{HRC}$ ，表面喷砂处理，无氧化脱碳、无裂纹及氧化皮等。

(2) 5CrNiMo 钢锻模的热处理工艺 用 5CrNiMo 钢制造的凸轮轴锻模的平均使用寿命为 8000 件左右，其主要的失效形式为磨损与变形，其热处理工艺见表 8-26。

(3) 4Cr5MoSiV1 钢锻模的热处理工艺 预热温度为 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ，在高温箱式电阻炉内加热，温度控制在 $1050 \sim 1080^{\circ}\text{C}$ ，保温结束后在 $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的热油中冷却。在电阻炉内完成回火工序，温度为 $620 \sim 640^{\circ}\text{C}$ ，为确保回火充分，应至少进行两次回火。4Cr5MoSiV1 钢制凸轮轴锻模的热处理工艺如图 8-28 所示。

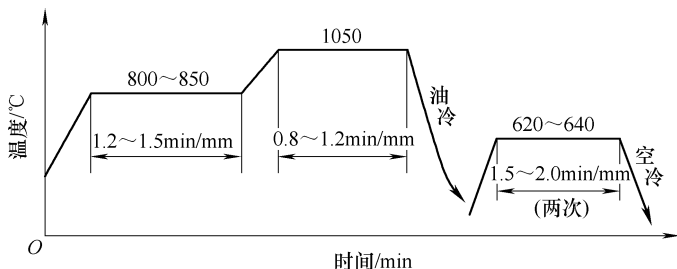


图 8-28 4Cr5MoSiV1 钢制凸轮轴锻模的热处理工艺（箱式炉）

4Cr5MoSiV1 钢锻模与 5CrNiMo 钢锻模相比,可获得更高的使用寿命。4Cr5MoSiV1 钢在使用温度低于 600℃时,具有高的热稳定性、高温强度、热疲劳抗力和良好的韧性,资料介绍,其平均寿命为 11 000 件,失效形式仍为磨损。从耐磨性和耐热疲劳性来看,相对 5CrNiMo 钢有了明显提高。为了提高锻模的寿命,防止出现早期的脆性断裂,要进行锻前预热,确保锻模的内外温度一致,降低断裂的倾向。

4. 锻模的热处理工艺分析与操作要点

1) 需要引起重视的是,在用高温箱式电阻炉加热锻模前应对其加以保护,避免因空气或其他氧化性气体超标造成模具型腔的腐蚀,严重者将直接影响到使用寿命,若有可能最好在可控气氛炉内完成加热的过程。

2) 淬火油温要符合工艺的技术要求,既能保证锻模淬透,又不会产生大的热应力和组织应力,锻模的变形小,在油中冷却至 150~200℃后要立即出油空冷。

3) 考虑到 4Cr5MoSiV1 钢淬火后残留奥氏体较多,锻模回火后的空冷应彻底,以确保组织转变的完成,另外锻前预热可有效防止模具的早期脆断。

参 考 文 献

- [1] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例 [M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 赵昌盛. 模具材料与热处理手册 [M] 北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册:第2卷 [M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 王忠诚. 热处理缺陷分析与对策 [M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [5] 罗百辉. 冲压模具技术问答 [M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [6] 李奇. 模具材料与热处理 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- [7] 程培源. 模具寿命与材料 [M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [8] 马伯龙. 实用热处理技术及应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 李有才. 模具材料 [M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [10] 郭耕三. 高速钢及其热处理 [M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [11] 王忠诚,李扬,尚子民. 模具热处理实用手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [12] 大和久重雄. 热处理 150 问 [M]. 杨佩璋,梁国明,译. 北京:北京科学技术出版社,1986.
- [13] 朱元浦,侯增寿. 金属热处理问答 [M]. 北京:机械工业出版社,1993.
- [14] 许天已,王忠诚. 钢铁零件制造与热处理 100 例 [M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [15] 李泉华. 热处理实用技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [16] 李乾方. 气门锻模的失效分析及提高寿命措施的探讨 [J]. 内燃机,2003 (3): 19-20.
- [17] 贾宪安,胡九锡. 热挤压工艺与模具设计 [M]. 北京:机械工业出版社,1986.
- [18] 上海工具厂. 刀具热处理 [M]. 上海:上海人民出版社,1971.
- [19] 马伯龙. 机械制造工艺装备件热处理技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2010.

- [20] 冯晓曾, 何世禹, 郭宝莲. 模具的失效分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [21] 李泉华. 热处理技术 400 问解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [22] 模具实用技术丛书编委会. 模具材料与使用寿命 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [23] 杨清泉, 等. H13 钢材质曲轴连杆锻造模具热处理工艺的设计 [J]. 金属加工 (热加工), 2009 (17): 41-42.

第 9 章

汽车零件先进的热处理技术与应用



9.1 概述

随着科学技术的飞速发展，汽车零件的热处理设备 and 工艺水平也得到了很大的改进和提高，许多新型的热处理设备得到研制和推广应用，为汽车零件的热处理技术提供了技术上与工艺上的保障，同时也为某些特殊要求的工艺奠定了坚实的基础。汽车零件热处理的目的是确保零件满足服役要求、获得长的使用寿命、节约材料和能源、经济环保、生产率高等，因此应研究零件的具体技术要求，结合实际生产现状，有针对性地提出科学而合理的工艺方案，围绕这几个方面分析和探讨相关的热处理加热与冷却设备、热处理工艺与技术发展前景。

9.1.1 汽车零部件的热处理技术

1. 渗碳热处理传感技术和计算机技术

汽车零件的渗碳热处理可使零件获得良好的抗疲劳性能和耐磨性，保证零件的使用性能与可靠性。采用渗碳淬火强化热处理的零件有：汽车驱动桥的差速器齿轮、变速器轴齿类零件、转向器轴齿件、发动机活塞销和齿轮零件等。

汽车零件的渗碳热处理装备主要有箱式多用炉，单排、双排以及多排连续炉，真空（低压）渗碳高压气淬炉等。十几年来，渗碳热处理技术发展的重要标志是传感技术和计算机技术在生产中的应用。对渗碳热处理工艺参数，如温度、时间、碳势、淬火过程以及动作程序完全自动控制，系统甚至可以根据零件的技术要求、材料牌号及特性等自动生成工艺，实现智能控制。

国内外汽车零件渗碳热处理生产线的特点有：

- 1) 工业计算机对炉温、碳势、自动线动作程序的监控与数据自动采集。
- 2) 对自动线渗碳热处理工艺过程的自动跟踪与监控，实现渗碳工艺仿真与优

化和零件渗碳质量的预测。

3) 对炉内温度、碳势和动作的实时显示及控制,系统故障自动诊断、显示及报警。

4) 生产工艺全过程在线自动显示、记录、保存、建档,建立可追踪的热处理质量管理体系,根据需要可以查询数月或数年前的生产记录。

近十几年来,真空(低压)渗碳高压气淬或油淬热处理技术在汽车零件热处理中得到推广应用,一般真空(低压)渗碳在小于2.7kPa的低压下进行,渗碳温度为880~980℃。

为适应更高真空渗碳的需要,开发了在1000~1100℃高温渗碳能够保证组织细化的新型齿轮钢。真空(低压)渗碳具有工艺时间大大缩短、原料消耗极少、零件变形小、热处理质量好、零件表面光洁、无污染的显著特点,是真正意义上的清洁、绿色热处理。

2. 汽车零件的调质热处理技术

汽车零件的调质热处理可分为保护气氛调质热处理和一般调质热处理。保护气氛热处理能够保证零件在热处理过程中不会产生表面氧化、脱碳等缺陷,确保零件的表面质量。当调质处理后零件工作面需要后续加工时,采用一般热处理。根据零件的质量、大小及批量等,调质热处理装备有网带炉、铸链炉、料盘(料筐)推杆式炉、托架炉、悬挂式连续炉等。以汽车紧固件热处理为例,调质热处理技术的发展主要体现在以下几方面:

1) 由于辐射管加热和网带寿命的大幅度提高,网带炉在国内标准件行业得到普遍应用,网带炉具有炉内布料、加热均匀、零件质量稳定、工作环境好等优点。特别是对高强度螺栓进行热处理时,采用网带炉使质量有了可靠保证。

2) 碳势控制技术在保护气氛调质生产线上得到普遍应用,采用碳势控制技术使炉内碳势控制精度达到 $\pm 0.03\%$,保证了零件热处理质量。

3) 计算机技术的应用拓展了工艺领域,通过计算机能够按照工艺设定自动完成工件的生产全过程,记录、保存工件生产中的各种工艺参数,具有完善的故障诊断、显示,安全警示及联锁功能。

4) 快速淬火油和水基淬火冷却介质的应用优势明显,快速淬火油的应用保证了高强度螺栓件的热处理内在质量。水基淬火冷却介质的应用解决了零件淬油不硬、淬水开裂以及零件淬火变形的质量问题。

3. 汽车零件的感应热处理技术

与一般炉内整体加热热处理相比较,感应热处理具有以下特点:

1) 根据产品性能要求只对零件表面或局部加热,实施表面或局部强化,是一种节能热处理。

2) 生产过程无污染,是清洁热处理。

3) 感应加热时间短、速度快, 有利于淬火组织的细化, 获得耐磨性、抗扭强度、弯曲疲劳性能俱佳的强化效果。

4) 感应淬火装置可以方便地安装在流水生产线上, 便于生产管理, 减少了物流成本。

5) 感应淬火生产节拍快、效率高, 能够实现完全自动化作业。

感应热处理所具有的这些特点, 使感应淬火技术在汽车零件生产中得到广泛应用。目前, 实施感应淬火的汽车零件主要为传递动力转矩的汽车轴类零件, 如曲轴、半轴、花键轴、传动轴、凸轮轴以及各种销轴类零件。

十几年来, 感应电源也有了迅猛发展。现在, 美、英、日、德、西班牙等工业发达国家生产的 SIT、IGBT、MOSFET 全固态晶体管电源已达几十种, 产品规格齐全, 体积小, 电能转换效率可达 92% 以上, 功率频率可以覆盖整个感应加热的领域。感应淬火机床正朝着柔性化、自动化、智能化控制方向发展。具有零件识别、能量控制、工艺参数显示及故障诊断、显示、报警功能的感应淬火装置在生产中得到普遍应用。另外对表面化学热处理后的零件进行高频感应淬火处理, 同样可提高零件表面的耐磨性等性能。

4. 锻造余热热处理技术

大部分汽车结构零件采用热锻成形工艺。利用锻造余热实施毛坯的热处理是节能的重要措施, 如采用锻造余热等温退火、锻造余热淬火等, 可以获得利于后续加工的组织和性能, 省去了再次加热的能耗, 节能效果十分显著。利用锻造余热进行热处理的零件有各类齿轮毛坯、前轴、转向节、摇臂、花键轴、曲轴、连杆等。针对齿坯的余热等温退火, 为了保证锻造余热热处理的组织、硬度均匀性, 需要严格控制终锻温度、等温温度等。对于余热淬火的零件, 为保证零件的强韧化性能, 除了直接淬火工艺外, 也可以采用预冷至 550 ~ 650℃, 完成珠光体转变后, 再次加热至奥氏体化温度的方法。主要目的是细化组织, 获得良好的强韧化性能。

9.1.2 汽车零件的保护加热技术

采用钢铁材料与非铁金属制造零件时加热是离不开加热设备和加热介质的, 加热过程中热量的基本传递方式有传导、对流和辐射等, 不同的热处理设备热量传递方式有所差异。目前热处理设备种类齐全, 从燃料炉 (燃气、燃油、燃煤等)、电阻炉 (箱式炉、井式炉、台车炉) 等到盐浴炉、连续作业电阻炉 (输送带式、推杆式、滚筒式、振底式和辊底式等)、可控气氛炉 (周期作业式和连续作业式两种)、流态粒子炉、真空炉等, 此外还有感应加热装置等。它们的加热方式各有特点, 加热介质有燃气、空气、盐浴、保护气体、流动粒子、惰性气体 (如氮气等) 以及真空等, 与加热零件表面作用后的产物将对表面状态和使用寿命等产生一定的影响。

如何完成零件在无氧化性气氛的设备中的加热, 是选定热处理工艺的前提, 从

国内外汽车零件热处理的现状来看,真空热处理、激光热处理、可控气氛热处理以及流态粒子热处理等具有很大的优越性,它们基本上解决了零件加热时表面的氧化、脱碳问题,盐浴如果能够及时脱氧也会有良好的效果,而燃料炉和电阻炉则难以满足技术要求,这一点要引起工艺人员的重视。因此从提高零件表面状态的要求出发,选择在中性气氛或保护气氛的介质中完成工件的加热,是目前汽车零件热处理的发展方向。

从热处理设备的节能和延长使用寿命来看,要从以下三个方面着手:

1) 炉型选择要以节能环保为基础,圆筒式炉比箱式炉更节能,原因在于表面积减少近14%,使炉壁散热量减少近20%,炉皮表面温度降低近10℃。

2) 热处理加热炉的炉顶和侧壁尽可能选用陶瓷纤维炉衬,这样既降低了设备制造成本,又缩短了加热升温时间,节约能源。

3) 在承载量允许的条件下,加热炉应尽量选用SiC导轨,减少耐热钢构件的使用。应尽快开发出替代耐热钢辐射管外套和料盘等构件用的新型材料,大幅度降低制造成本和使用成本。

9.1.3 汽车零件的表面改性、形变热处理与复合热处理技术

1. 表面改性技术

表面改性技术(surface modified technique)是采用化学的、物理的方法改变材料或工件表面的化学成分或组织结构以提高机器零件或材料性能的一类热处理技术。它包括三类:化学热处理(渗氮、渗碳、碳氮共渗、氮碳共渗、渗金属等);表面涂层(低压等离子喷涂、低压电弧喷涂、激光重熔复合等薄膜镀层)和非金属涂层(物理气相沉积、化学气相沉积等)技术;表面相变热处理等。这些用以强化零件或材料表面的技术赋予零件耐高温、耐腐蚀、耐磨损、抗疲劳、防辐射、导电、导磁等各种新的特性。使原来在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质环境下工作的零件,提高了可靠性,延长了使用寿命,具有很大的经济意义和推广价值。

汽车零件除了进行常规的热处理外,通过表面改性技术(化学热处理、表面相变热处理和表面覆层技术等)可改变零件的表面性能,它已经成为对零件的使用寿命有重要影响的工艺,使零件的表面和内部形成了不同的组织状态,因此从某种意义上讲是获得了复合材料,它赋予了材料特有的力学性能,在耐磨性方面可以代替成本高的高碳钢、不锈钢以及其他材料,在耐蚀性方面胜过发蓝、磷化、镀锌以及镀铬等表面处理技术。

2. 形变热处理技术

形变热处理是指对金属材料进行的形变强化与热处理相变强化有效结合的工艺方法。对金属材料在马氏体点以上的温度进行压力加工(锻、轧等塑性变形)后,立即利用余热进行零件的淬火(不用再次加热),以达到形变强化与相变强化的双重强化效果,即达到成形与改善显微组织的双重目的,得到比单一强化更高的力学

性能,是一种新型的热处理工艺。综合起来可分为高温形变热处理、中温(亚温)形变热处理与低温形变热处理及形变化学热处理,这种方法既能获得一般加工方法达不到的高强韧性的良好组合,也可简化材料或工件的生产工艺过程,其优点为节省工序、减少能源消耗、节省钢材、充分发挥金属材料的潜力、减少氧化损失及脱碳、翘曲等热处理缺陷等,因此提高了零件的产品性能与质量。

高温形变淬火后,应根据零件的性能与要求进行回火,高强度零件进行低温($100 \sim 200^{\circ}\text{C}$)回火即可,要求塑性好或特殊条件下(低温或高温)工作的工件进行高温回火。

中温(亚温)形变淬火可大大改善钢的冷脆性能,即降低冷脆转变温度,用作在严寒地区工作的结构件以及冷冻设备上的零件的热处理。低温形变淬火获得马氏体组织。形变热处理工艺不仅可用于碳素结构钢、合金结构钢,还可用于工具钢、不锈钢、耐热钢、高温合金等,以及以铝、镁、钛、铜等为基的非铁金属合金。形变热处理主要用于形状简单、截面变化和加工余量不大的零件。

3. 复合热处理技术

近年来为了节约能源,使零件获得更好的力学性能,国内外开始把各种强韧化热处理、表面合金化、表面淬火、表面功能性覆层、形变强化等工艺进行了多种类型的组织和复合,使汽车零部件的性能有了很大的提高,并把它开辟为新的热处理技术领域。复合热处理是将两种或更多的热处理工艺复合,或是将热处理与其他加工工艺复合,使各工艺间互相弥补增强,以更大程度地挖掘材料潜力,使零件获得单一工艺所无法达到的优良性能。从而使零件的性能有了很大提高,因此,复合热处理技术具有十分广阔的应用前景。

复合热处理工艺选用应遵循的原则为:功能继承原则,无论是心部强韧化还是表面强化,对于两种整体强化或两种表面处理工艺的复合,应当注意加热规范与冷却规范的合理性,考虑它们之间的相互作用和对钢的组织性能的影响,确实做到工艺或功能的互补加强;优质经济原则,从经济性与合理性出发考虑复合热处理工艺,通过工艺复合可具备多种功能,或提高工件的性能、大幅度提高寿命等,而不会增大工件的变形与开裂倾向,其消耗的资金应少于适当改善工件性能和提高寿命而节约的资金,在经济上是合理的才符合要求。

9.1.4 汽车零件现代热处理技术的主要发展趋势

随着现代热处理制造技术的迅速发展,可控气氛热处理技术、真空热处理技术、感应热处理技术、计算机热处理控制技术、表面改性热处理技术、热处理冷却技术、精密热处理技术、节能热处理技术、复合热处理技术、修复热处理技术、流态床热处理技术、激光热处理技术等获得了长足的进步,这也代表了汽车零件热处理技术的发展方向。从某种程度上讲,热处理工艺与设备开发并举,大大提高了汽

车零件的热处理生产水平和质量水平，同时为清洁、节能和环保型绿色热处理技术奠定了良好的基础。

现代热处理技术为制造业和机电产品的更新换代、提高质量、节能降耗、发挥材料的潜力与延长产品使用寿命提供了保证，因此，应用成熟的热处理技术，不断提出新的热处理手段是热处理行业的发展方向。

9.2 激光热处理

9.2.1 激光热处理的原理和特点

激光热处理是20世纪60年代逐渐发展起来的热处理技术，利用高能激光束扫描金属零件的表面，500~10 000W的CO₂激光器使表层金属以极快的速度加热，当高密度能的激光斑在金属表面以一定的速度扫过时，表面温度达到相变点以上（奥氏体状态），停止加热后零件表面的热量迅速向金属内部传递，表面快速冷却从而实现零件的表面淬火。热处理后获得了极细的硬化层组织，显著改善了耐磨性等。通常的激光热处理装置如图9-1所示，其关键设备为发生器，该工艺是表面淬火的一种，激光淬火钢件表层可获得极细的马氏体组织，合金钢硬化区组织为极细的板条状或针状马氏体、未溶碳化物及少量的残留奥氏体，激光硬化区与基体交界处呈现复杂的多相组织，利用激光淬火可以改善模具的表面硬度、耐磨性、热稳定性、抗疲劳性以及临界断裂韧度等力学性能，它除了具有一般表面淬火的特点外还具有以下特点：表面硬化层的深度、淬火面积、硬度分布可以精确控制，可获得优质的硬化层；可解决复杂形状零部件、易变形件等淬火困难的问题，实现不通孔底部、型腔、薄片或薄层等的表面处理，或有选择的局部表面淬火，可硬化极小的部位；能够进行各种金属或合金的表面淬火和化学热处理，以获得各种物理、化学性能和特殊的力学性能等；可减少加工工序，工件的变形极小，激光热处理后的零件可以不再进行精加工；高速加热和高速冷却，表面光亮，表面无氧化和脱碳；无接触加热，靠自冷却淬火，不需要淬火冷却介质，对工件与环境无污染；设备简单，易于操作，不需要真空保护装置或设备，可在大气中进行，易于控制与实现自动化。

激光热处理通过对光斑、扫描速度、激光功率等的调节，来控制零件表面温度、透热深度等，达到快速加热并自冷淬火的目的，原材料的组织状态直接影响到透热深度，通常要求其为上贝氏体。

激光淬火多用于灰铸铁、球墨铸铁、碳素钢、合金钢以及马氏体不锈钢的表面热处理，可使硬化层残留有较大的压应力，完成模具表面一定深度的硬化处理，大大提高了模具表面的耐磨性、疲劳强度等。文献指出，模具在承受预压应力的条件下进行激光淬火，随后撤掉外力，可显著提高模具的表面残留压应力，同时也提高

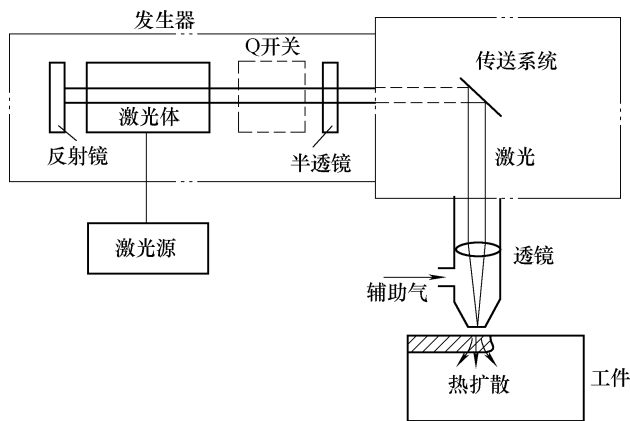


图 9-1 激光热处理装置

了模具的抗压强度、耐蚀性与疲劳强度等，提高了模具的使用寿命。激光淬火可使马氏体点阵畸变增大，特殊碳化物的析出增多及硬化层晶粒超细化，从而使得材料激光淬火后的硬度比常规淬火更高，可比高频感应淬火后的硬度高 15% ~ 20%。激光淬火与高频感应淬火硬度的对比见表 9-1。

表 9-1 激光淬火与高频感应淬火硬度的对比

材 料	硬度 HRC	
	高频感应淬火	激光淬火
30	40 ~ 45	51 ~ 54
45	51 ~ 60	60 ~ 66
18Cr2Ni4WA	41 ~ 42	51 ~ 56
40CrNiMo	457HV	650 ~ 800HV
T12	825HV	1050HV

激光淬火加热速度和冷却速度快，对晶粒有明显的细化作用（表 9-2），同时，激光淬火层具有一系列优异的力学性能。

表 9-2 材料激光淬火前后晶粒度的变化

材 料	预备热处理工艺	原晶粒度/级	激光淬火后晶粒度/级
45	淬火 + 低温回火	8 ~ 9	11 ~ 12
45	调质处理	8 ~ 9.5	11 ~ 12
GCr15	淬火 + 低温回火	9 ~ 10	11.5
W6Mo5Cr4V2	淬火 + 高温回火	10	15
Cr12	淬火 + 低温回火	12	15
25Cr2Ni4WA	淬火 + 低温回火	11.9	13.7

9.2.2 激光热处理的应用

根据激光热处理的特点可知激光加热的时间极短，奥氏体晶粒来不及长大，因此要求表面硬度高、耐磨性好、疲劳强度高和变形小的零件是十分适合进行激光热处理的。一般照相机上的主动环、推板等薄壁的小零件，在某个部位要求具有高的硬度和耐磨性，采用激光处理可满足技术要求，同时其工艺简单、效率高，淬火后的硬度比普通淬火高 5~10HRC，其中铸铁件激光淬火后耐磨性提高了 3~4 倍。高速工具钢盘形铣刀、大功率柴油机的活塞环、齿轮摇臂钻床外柱内滚道等可选用激光热处理。对铸铁凸轮轴进行熔化-凝固处理后，表面获得了极细的莱氏体组织，硬度达 52~54HRC，提高了耐磨性和耐蚀性；在排气门阀口激光熔覆合金，可节约 80% 的合金材料和 1/3 的时间，并且零件的使用寿命得到了明显提高。

要进行激光热处理，必须提高光能的吸收率，通常对零件表面进行黑化处理（磷酸盐法），表 9-3 为 45 钢和 42CrMo 两种钢进行激光淬火的性能比较。几种材料进行激光处理后的耐磨性对比见表 9-4。从表中可以看出，激光处理后材料的性能得到了明显的提高，在提高零件使用寿命方面是很有发展前景的新工艺，值得推广和应用。

表 9-3 45 钢和 42CrMo 两种钢进行激光淬火的性能比较

材 料 牌 号	黑化处理方法	淬硬层深度/mm	淬硬带宽度/mm	硬度 HV	组 织 特 征
45	氧化处理 磷化处理 涂磷酸盐	0.19~0.20	1.08~1.10	542	细针马氏体
		0.22~0.27	1.10~1.23	542	
		0.25~0.31	1.18~1.35	585	
42CrMo		≤0.25	1.30	842	隐针马氏体
		≤0.35	1.53	642	
		≤0.35	1.64	624	

表 9-4 几种材料进行激光处理后的耐磨性对比

材 料 牌 号	磨损量/mm ³		
	激光处理	淬火 + 低温回火	淬火 + 高温回火
45	0.105	0.161	2.232
T12	0.082	0.131	—
18Cr2Ni4WA	0.386	0.837	2.232
40CrNiMoA	0.064	0.082	1.047

激光扫描后金属表面发生了微观结构的变化，因此其性能也有不同。激光淬火

后获得了高密度位错型和孪晶型超细隐针马氏体混合组织，前者具有良好的塑性和韧性，而后者有高的强度和硬度，此外淬火形成的颗粒碳化物分布均匀、细小，可提高其耐磨性、疲劳强度等，由此可见激光处理零件的优越性。

激光热处理的应用范围十分广泛，除了进行一般的表面淬火和化学热处理外，还能进行凝固处理、激光“上亮”处理、表面合金化以及熔覆处理等，随着技术的进步，激光热处理必将发挥出重要的作用。40 钢主轴进行激光淬火，光束摆动宽度为 17.8mm，扫描速度为 0.5cm/min，淬火后硬度为 57HRC，在 0.3mm 深度范围内大致维持该硬度值，在接近心部时降至 40HRC 左右，降低扫描速度可获得较深的硬化层。40 钢主轴激光淬火后的硬度趋势图如图 9-2 所示。钢铁材料激光淬火后，表层分为硬化区、热影响区（过渡区）和基体三个区域，如图 9-3 所示。图中白亮色的月牙为硬化区，其组织与常规淬火相似；白亮区周围为过渡区，是部分马氏体转变的区域；过渡区之外为基体。典型材料的激光淬火层组织见表 9-5。

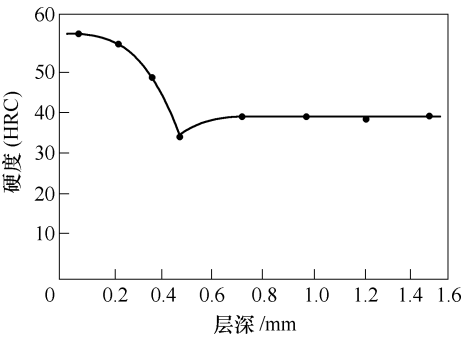


图 9-2 40 钢主轴激光淬火后的硬度趋势图

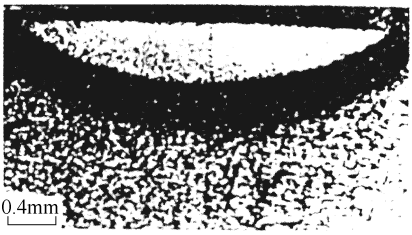


图 9-3 钢铁材料激光淬火区的横截面金相组织

表 9-5 典型材料的激光淬火层组织

材 料		硬 化 区	过 渡 区	基 体
钢种	钢号			
碳素钢	20	板条状马氏体	马氏体 + 细珠光体	珠光体 + 铁素体
	45	细小板条状马氏体	马氏体 + 托氏体（调质态） 隐针马氏体 + 托氏体 + 铁素体（退火态）	珠光体 + 铁素体
	T10	针状马氏体 + 残留奥氏体	马氏体 + 托氏体 + 渗碳体	珠光体 + 渗碳体

(续)

材 料		硬 化 区	过 渡 区	基 体
钢种	钢号			
合 金 钢	42CrMo	隐针马氏体	隐针马氏体 + 回火索氏体 + 珠光体	珠光体 + 铁素体
	GCr15	隐针马氏体 + 合金碳化物 + 残留奥氏体	隐针马氏体 + 回火托氏体 + 回火索氏体 + 合金碳化物	回火马氏体 + 合金碳化物
	W18Cr4V	隐针马氏体 + 未溶碳化物 + 残留奥氏体	隐针马氏体 + 回火索氏体 + 回火托氏体 + 合金碳化物颗粒	回火马氏体 + 合金碳化物 + 残留奥氏体
铸 铁	HT200	马氏体 + 残留奥氏体 + 未溶石墨带	马氏体 + 珠光体 + 片状石墨	珠光体 + 片状石墨 + 少量磷共晶
	QT600-3	马氏体 + 残留奥氏体 + 球状石墨	马氏体 + 珠光体 + 球状石墨	珠光体 + 球状石墨

激光热处理是提高模具寿命的有效途径，GCr15 钢轴承保持架冲孔凹模经过常规的热处理后，硬度为 52 ~ 62HRC，使用寿命为 1.12 万次，失效形式为崩刃或刃边磨损等，采用激光淬火后使用寿命达到 2.8 万次。部分模具钢激光热处理的效果见表 9-6。部分零部件激光热处理应用实例见表 9-7。

表 9-6 部分模具钢激光热处理的效果

材 质	激光热处理类型	效果与指标
Cr12MoV	激光淬火	改善淬火组织，具有较高的硬度，较强的抗塑性变形和抗粘着能力
Cr12	激光相变强化	硬度高达 1100HV，并细化组织
Cr12MoV	激光淬火	淬火层晶粒细小，比基体具有更高的硬度和较好的韧性
9SiCr	激光淬火	硬化区显微硬度比基体高 200 ~ 300HV，表面硬度、耐磨性、疲劳寿命均有很大程度的提高，搓丝板激光淬火后寿命提高 20% ~ 30%
3Cr2W8V	激光淬火	轧辊的强度高，韧性好，表面组织应力差异小，不易产生裂纹、起皮、掉肉以及断裂缺陷，使用寿命提高 2 倍
4Cr5MoSiV1	激光快速熔凝	熔区具有较高的硬度和良好的热稳定性，抗塑性变形能力强，对疲劳裂纹的萌生和扩展有明显的抑制作用
T10A	激光相变硬化	淬硬层为细板条状马氏体 + 少量弥散碳化物组织，层深为 0.75 ~ 1.00mm，硬度高，疲劳强度高，耐磨性、耐蚀性和耐热性良好，过渡层有一定的抗冲击能力

表 9-7 部分零部件激光热处理应用实例

零件名称	材 质	应用效果
汽车发动机缸体	HT200 铸铁	硬度达 63.5 ~ 65HRC，耐磨性提高 2 ~ 2.5 倍
气缸套齿轮	CrNiMoCu 灰铸铁、 30CrMnTi	耐磨性提高 0.5 倍，抗咬合性提高 0.3 倍，变形小，不需研磨，接触疲劳极限达 1323MPa，高于调质态（1024MPa）
动力转向装置外壳	可锻铸铁	激光淬火硬化层深 0.35mm，宽 1.5 ~ 2.5mm，寿命比未激光淬火的提高 3 ~ 10 倍
纺织机锭杆	GCr15	与常规淬火件相比，耐磨性提高 10 倍
曲轴	45 钢	表层组织细化，强度和疲劳寿命显著提高
凸轮轴	铸铁	变形不大于 0.13mm，耐磨性有很大提高
轧辊	3Cr2W8V	表面硬度为 55 ~ 63HRC，压应力为 50MPa，使用寿命提高 1 倍
刀具	W18Cr4V	提高高温硬度和热硬性，刀具变形小，提高使用寿命
工模具	3Cr2W8V	处理后获得了大量细小弥散的碳化物，均匀分布于隐晶马氏体上，可提高耐磨性和临界断裂韧度
模具（落料冲模）	T10A	冲模刃口硬度可达 1200 ~ 1350HV，首次重磨寿命由 0.45 ~ 0.5 万次增加到 1.0 ~ 1.4 万次

由于激光是快速局部加热，因此各种材料经过相变硬化处理后，可以获得晶粒非常细小的表层组织，不但具有良好的强度、硬度，而且提高了韧性，从而使材料的表面性能得到改善，耐磨性显著提高，表 9-8 为几种钢激光淬火后的磨损情况。可以看出激光淬火可有效解决模具的磨损失效和疲劳失效以及局部塑性变形等问题，从而延长模具的使用寿命。

表 9-8 几种钢激光淬火后的磨损情况

材料名称	处 理 规 范	激光硬化面积率（%）	磨损量/mg
20Cr	渗碳、淬火		2.2 ~ 2.9
	激光硬化	10	3.1 ~ 4.0
		20	2.5 ~ 3.1
38CrMoAl		30	1.3 ~ 3.3
	硬渗氮		3.4 ~ 4.9
	激光硬化	10	4.7
		20	2.9 ~ 4.5
		30	2.3 ~ 2.7

(续)

材料名称	处理规范	激光硬化面积率 (%)	磨损量/mg
40Cr	调质处理		10.2 ~ 13.5
	激光硬化	20	2.0 ~ 3.5
		30	2.3 ~ 2.7
45	调质处理		30.9 ~ 40.9
	激光硬化	20	2.1 ~ 4.4
		30	2.2 ~ 2.9
20CrMnTi	渗碳、淬火		3.3 ~ 4.6
	激光硬化	10	2.6 ~ 4.5
		20	1.9 ~ 2.2
		30	1.4 ~ 1.6

9.3 形变热处理

形变热处理是将形变强化与热处理相变强化有效结合的工艺方法，其优点为节省工序、减少能源消耗、减少钢材的热处理缺陷等，因此提高了零件的产品性能。

目前形变热处理作为一种十分重要的工艺方法，综合起来可分为高温形变热处理、中温（亚温）形变热处理、低温形变热处理和形变化学热处理等类型。形变热处理是以形变强化效果有遗传性为基础发展起来的，其利用了金属材料经过形变热处理后的强化效果经过多次重结晶后仍可再现的特点。形变强化的基本规律为：初始的形变温度越高，强化效果越低，而二次淬火后强化效果的再现性越高。低温形变淬火后的中间加热，使强化效果的稳定性得到提高，二次淬火后强化效果的再现程度有所增大。

形变热处理后获得了比普通热处理时更高的强度和断裂韧度，其主要原因为形变使晶界扭曲变成锯齿状，增大了零件中的位错密度和加速了合金元素的扩散，促成了合金碳化物的沉淀；同时塑性也得到提高，这是由于细小、弥散分布的合金碳化物的沉淀降低了奥氏体中碳和合金元素的含量，淬火时没有形成孪生的、界面不规则的细片状马氏体，并且回火时马氏体片间沉淀出细小的碳化物。

形变热处理应用范围很广，各种钢和非铁金属均可进行形变热处理，根据形变热处理的淬火温度与形变温度的不同，分为以下几类：

- 1) 形变在相变之前的有低温形变淬火、中温形变淬火、高温形变等温淬火、亚温形变淬火、亚温形变等温淬火、低温形变等温淬火等。
- 2) 形变在相变过程中的有等温形变淬火、连续冷却形变处理、诱发马氏体的

室温形变、过饱和固溶体的形变时效等。

3) 形变在相变温度之后的有珠光体形变、珠光体冷形变、马氏体形变时效等。这里简单介绍低温形变淬火（或中温形变淬火）和高温形变淬火，供参考。

9.3.1 形变热处理类型与特点

1. 低温形变淬火

低温形变淬火是将结构钢零件加热到奥氏体化温度 Ac_3 以上奥氏体化后，保温适当时间，快速冷却到相变温度以下，并在低于再结晶温度而高于 M_s 的温度进行轧制、锤锻、挤压、深拉等形变，在该温度内进行一次或多次加工形变，随后迅速进行淬火和回火，以获得高强度马氏体组织的复合热处理工艺，如图 9-4 所示。它的强化效果好，材料的抗拉强度也比一般的热处理高，事实表明零件的形变量越大，强化效果越显著。可进行该处理的多为中、高合金钢零件，即奥氏体亚稳定钢，它们有较高的淬透性和较宽的亚稳定奥氏体区。

奥氏体化温度、形变温度、形变量以及形变后的停留时间和形变后的再加热、冷却速度等均影响低温形变淬火的效果。

从 9-4 图中可知，这种方法是在过冷奥氏体稳定性最大的区域内形变后进行淬火的，因此要注意防止形变过程中过冷奥氏体的相变（无贝氏和珠光体的转变），经过形变淬火后的钢强度得到了提高，塑性好。

低温形变淬火与高温形变淬火相比极大提高了屈服强度和疲劳强度等，由于是在再结晶温度进行的形变，因此不存在因再结晶而降低强度的可能性。该方法的形变量可达 70% ~ 90%，通常在 400 ~ 500℃ 进行形变处理，晶界严重扭曲，产生了大量的亚晶和位错，因此提高了强度。另外形变过程中析出了许多细小的碳化物，它们沉积于位错周围，起到了钉扎位错的作用，因此大大提高了零件的强度。

低温形变淬火在模具上获得了较为广泛的应用，见表 9-9。

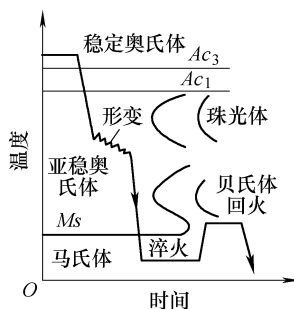


图 9-4 钢的低温形变淬火原理

表 9-9 低温形变淬火在模具上的应用实例

冲头名称	材 质	热处理类型	平均寿命
铆钉镦粗冲头	55Si2Mn	普通热处理（61HRC）	42h
	4Cr5SiMoV1	低温形变淬火（62HRC）	64h
	5Cr4W5Mo2V	低温形变淬火（66HRC）	72h

(续)

冲头名称	材 质	热处理类型	平均寿命
铆钉冲头	W18Cr4V2Co8	普通热处理 (63HRC)	20 000 件
	4Cr5SiMoV1	低温形变淬火 (62HRC)	60 000 件
φ8mm 内六角圆柱头 螺钉头部成形冲头	W18Cr4V2Co8	普通热处理 (63HRC)	30 000 件
	4Cr5SiMoV1	低温形变淬火 (62HRC)	70 000 件
φ12mm 内六角圆柱头螺 钉头部成形冲头	W18Cr4V2Co8	普通热处理 (63HRC)	50 000 件
	5Cr4W5Mo2V	低温形变淬火 (66HRC)	160 000 件
穿孔挤压冲头	W6Mo5Cr4V2	普通热处理 (60 ~ 63HRC)	77 000 件
	4Cr5SiMoV1	低温形变淬火 (62HRC)	120 000 件
φ25mm 热穿孔冲头	3Cr3Mo3W2V	普通热处理 (52 ~ 54HRC)	14 000 件
		低温形变淬火 (55 ~ 59HRC)	25 000 件
硅钢片冲模	W18Cr4V	普通热处理	35 000 ~ 40 000 件
		低温形变淬火	70 000 ~ 80 000 件

注：1. 普通热处理是指淬火 + 回火处理。

2. 低温形变淬火是指低温形变淬火 + 回火处理。

另外低温形变淬火除了在模具上应用外，其在机械零件上也有推广价值。55CrMnA 钢制直径为 5mm 的弹簧钢丝，经过 500℃ 形变淬火处理（形变量为 50.5%）和 400℃ 回火处理后，抗拉强度提高了 400 ~ 500MPa，疲劳强度提高了 60 ~ 70MPa。W18Cr4V 钢车刀，450℃ 时形变淬火（形变量为 10%），560℃ 三次高温回火处理，使用寿命提高了 1 倍。

2. 亚温形变淬火（中温形变淬火）

亚温形变淬火是对结构钢在 $Ac_3 \sim Ac_1$ 温度区间内，进行形变与淬火联合操作的热处理工艺，也称为亚稳奥氏体形变淬火。钢的亚温形变淬火原理如图 9-5 所示。图 9-5a 所示为首先将钢材或工件进行完全奥氏体化加热，随后冷却到 $Ac_3 \sim Ac_1$ 亚温区保温适当时间，进行形变与淬火处理。图 9-5b 所示为将钢材或工件进行一次完全淬火，再加热到 $Ac_3 \sim Ac_1$ 亚温区保温，最后进行形变与淬火处理。需要注意的是，后者处理后的组织比前者细小且均匀，形变淬火后获得了更好的力学性能。事实上形变温度越低，铁素体的数量越多，马氏体数量越少。马氏体中碳含量越高，则钢或工件的性能越接近于纤维增强复合材料。

亚温形变淬火可大大改善钢的冷脆性能，即降低冷脆转变温度，故适用于在严寒地区工作的结构件和冷冻设备上零件的热处理。

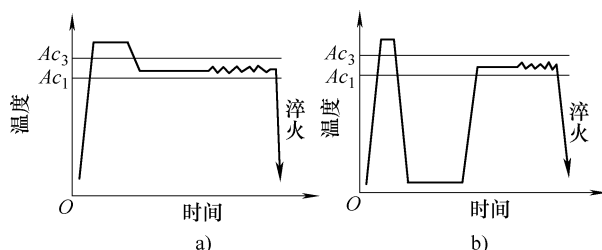


图 9-5 钢的亚温形变淬火原理

3. 高温形变淬火

高温形变淬火是将零件加热到奥氏体化温度以上即 $Ac_3 + 30 \sim 60^\circ\text{C}$ ，保温一定时间后进行形变如轧制、拔丝、模锻、旋压以及挤压等，然后淬火处理的过程，即高于奥氏体再结晶温度进行形变后再发生相变的工艺，如图 9-6 所示。高温形变淬火后获得了马氏体组织，随后根据零件的性能要求和钢的特性进行回火。碳素钢和合金钢均可进行高温形变淬火，从形变的温度可知此时零件仍处于锻、轧温度，因此它是利用锻、轧余热进行的淬火，故称为形变余热淬火。高温形变淬火的主要优点为：提高

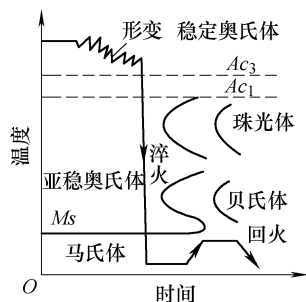


图 9-6 钢的高温形变淬火原理

钢在高温及低温下的强度和塑性；消除回火脆性；提高热强性和冲击韧性；降低钢的缺口敏感性，改善断裂韧性等。资料介绍，60Si2Mn 汽车弹簧钢板在 930°C 热轧形变量为 18%，形变后在 60s 内淬入 20 号机械油中冷却，随后在 650°C 的温度下进行 185s 的快速回火，强度大大提高，其使用寿命提高 10 倍。经过高温形变淬火后零件的强度提高 10% ~ 30%，塑性提高 40% ~ 50%，韧性和硬度也均有提高，见表 9-10。

表 9-10 几种零件高温形变淬火与普通淬火的性能对比

零件名称 与材料	工艺流程和技术参数	R_m /MPa	Z (%)	α_K /(J/cm ²)	硬度 (HBW)
拖拉机 接盘 45	① 1100℃ 锻造成形，停留 30s，水冷，回火工艺为 $560^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$	880	47	58	260
	② 普通淬火，840℃ 水冷，回火工艺为 $560^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$	790	43	56	255
135 柴油机 连杆 40Cr	① 1180℃ 锻造成形，停留 30s，油冷，回火工艺为 $670^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$	830	68	175	250
	② 900℃ 正火，850℃ 油冷，回火工艺为 $620^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$	770	66	160	235

(续)

零件名称 与材料	工艺流程和技术参数	R_m /MPa	Z (%)	a_K /(J/cm ²)	硬度 (HBW)
拖拉机 吊钩 45Cr	① 1200℃锻造成形, 停留 30s, 水冷, 回火工艺为 580℃ × 1.5h	1130	37	88	327
	② 850℃ 油冷, 回火工艺为 600℃ × 1.5h	1000	45	57	235
履带链板 40Mn	① 1200℃锻造成形, 停留 30s, 油冷, 回火工艺为 600℃ × 1.5h	870	$A = 20$	89	268
	② 830℃水冷, 回火工艺为 600℃ × 1.5h	800	$A = 21$	85	246
高强螺母 20CrMn	① 1200℃锻造成形, 停留 30s, 油冷, 回火工艺为 600℃ × 2h	870	74	—	235
	② 880℃ 正火, 油冷, 回火工艺为 600℃ × 2h	730	72	—	210

影响高温形变淬火强化效果的因素有钢的化学成分、形变温度、形变量以及形变速度等。

需要特别注意的是进行形变淬火时应控制以下几个重要的工艺参数：形变量、形变温度、淬火前的停留时间、回火温度等。形变温度的高低影响基体的强度，淬火时间的长短则影响其硬度等力学性能，这与钢的淬透性有关，碳素钢与高合金钢相比则要求快速冷却，否则无法获得要求的力学性能。

高温形变淬火后，应根据钢材或工件的性能要求进行回火处理，高强度结构件可进行低温（100 ~ 200℃）回火处理，要求塑性较好或在特殊条件下（包括低温或高温）服役的工件应进行高温回火处理。

9.3.2 形变热处理的工艺与应用

形变热处理既简化了工序、降低了成本，又使金属材料达到了更好的强度与韧性的配合，提高了力学性能。形变热处理工艺及应用见表 9-11。

表 9-11 形变热处理工艺及应用

类别	工 艺	原 理	用 途	效 果
低温 形变 热处 理	低温形 变淬火	钢在奥氏体化后急冷至 等温转变区（500 ~ 600℃），进行 60% ~ 90% 的形变后淬火	高强度零件有：飞机 起落架、火箭蒙皮、高 速工具钢刀具、模具、 炮弹及穿甲弹壳、板 簧等	保持良好的韧性，提高 强度和耐磨性，可将钢的 强度从 1800MPa 提高到 2500MPa 以上

(续)

类别	工 艺	原 理	用 途	效 果
低温形变热处理	低温形变等温淬火	钢在奥氏体化后急冷至等温转变区 (500 ~ 600℃), 进行形变后在贝氏体区等温淬火	热作模具	在保持较高韧性的前提下, 提高强度至 2300 ~ 2400MPa
	等温形变淬火	钢在等温淬火的奥氏体-珠光体或奥氏体-贝氏体转变过程中形变	适合于等温淬火的小零件或部件有: 小轴、小模数齿轮、垫片、弹簧和链节等	提高强度、显著提高珠光体转变产物的冲击韧度
	连续冷却形变处理	在奥氏体的连续冷却转变过程中进行形变	适用于小型精密耐磨、抗疲劳件	能实现强度与韧性的良好配合
	诱发马氏体的低温形变	对奥氏体进行室温或更低温度的形变 (一般为轧制), 随后时效处理	18-8 型 不 锈 钢、PH15-7Mo 过渡型不锈钢以及 TRIP 钢	在保证韧性的前提下提高强度
高温形变热处理	高温形变淬火	精确控制终锻和终轧温度, 利用锻、轧余热直接淬火, 并进行回火处理	用于加工量不大的碳素钢和合金结构钢零件: 连杆、曲轴、叶片、弹簧、农 机 具 以 及 枪 炮零件	提高强度 10% ~ 30% , 改善韧性、疲劳抗力、回火脆性、低温脆性和缺口敏感性等
	高温形变正火	适当降低终锻、终轧温度, 空冷或强制空冷, 或等温空冷	适用于改善以微量元素 V、Nb、Ti 等强化的建筑结构钢材料的塑性和用作碳素钢及合金结构钢锻件的预备热处理	提高钢材韧性, 降低脆性转变温度, 提高疲劳抗力
	高温形变等温淬火	利用锻、轧后的余热进行珠光体区域或贝氏体区域内的等温淬火	用于碳质量分数为 0.4% 的钢缆绳和高碳钢丝以及小型紧固件等	提高了强度和韧性
	利用形变强化遗传性的热处理	采用高温或低温形变淬火使毛坯强化, 并进行中间软化回火, 利于机械加工, 再进行二次淬火和低温回火, 可再现形变强化的效果	适用于形状复杂、切削量大的高强钢零件	提高了强度和韧性, 取消了毛坯预备热处理工艺

(续)

类别	工 艺	原 理	用 途	效 果
高温形变热处理	表面高温形变淬火	采用高频或盐浴将工件表面加热到 Ac_1 或 Ac_3 以上, 进行滚压强化淬火	高速传动轴、轴承套圈等圆柱形或环形零件, 履带板和挖掘机铲斗等磨损零件	显著提高零件的疲劳强度和耐磨性以及使用寿命
	复合形变热处理	把高温形变淬火和低温形变淬火复合, 或将高温形变淬火与马氏体形变时效复合	适用于 Mn13、工具钢和冷作模具钢等难以强化的材料	提高强度、韧性、疲劳强度和耐磨性等综合力学性能
形变化学热处理	利用锻造余热渗碳淬火或碳氮共渗	零件在奥氏体化温度以上模锻成形, 随即在炉中渗碳或碳氮共渗淬火、回火	中等模数的齿轮	节能显著, 提高了渗速、硬度和耐磨性
	锻造余热淬火渗氮	钢件低温形变淬火后, 高温回火时进行渗氮或氮碳共渗	模具、刀具及耐磨件等	加速渗氮或氮碳共渗过程, 提高耐磨性
	低温形变淬火渗硫	钢件低温形变淬火后, 将回火与低温电解硫结合于一体	高强度摩擦偶件: 凿岩机活塞、牙轮钻等	提高了心部强度, 表面减摩性增强
	渗碳件表面形变时效	渗碳、渗氮、碳氮共渗后, 在常温下进行表面喷丸(抛丸)或滚压, 并进行低温回火处理, 使表面产生形变时效效果	航空发动机齿轮、内燃机钢套等耐磨及疲劳性能要求极高的零件等	可显著提高零件的表面硬度、耐磨性, 使表面产生压应力, 提高了疲劳抗力
	渗碳表面形变淬火	利用高频电流加热渗碳件表面, 并进行滚压淬火, 或渗碳后直接滚压淬火	用于齿轮等渗碳件	表面可获得极高的耐磨性

9.4 复合热处理

复合热处理是指将两种或两种以上的热处理工艺复合, 或是将热处理与其他加工工艺复合, 使各工艺间互相弥补增强, 以更大程度地挖掘材料潜力, 使零件获得单一工艺无法达到的优良性能与技术要求。例如对强韧化处理、表面合金化、表面淬火、表面功能性覆盖、形变强化等工艺进行了多种类型的组合与复合, 从而使零

件的性能有了很大提高,成为目前国际上开辟的热处理技术领域,复合热处理技术具有十分广阔的应用前景。

(1) 多种热处理方法的复合 如表面合金化与淬火,渗碳或碳氮共渗后的淬火(重新加热淬火或渗后直接淬火),渗碳或渗氮后用激光进行表面淬火,表面硬化与低温回火下的表面化学热处理,淬火处理+高中温回火温度下的化学热处理,两种化学热处理方法的复合,化学热处理与涂层(化学沉积或电镀)的复合,化学镀与热处理的复合。

(2) 热处理与其他工艺的复合 压力加工与热处理复合的形变热处理,整体或表面强化+表面形变强化(辊压、喷丸),整体或表面强化+表面功能性覆层(电镀、喷涂、有机树脂涂层等)。其中形变化学热处理是把塑性变形加工工艺与化学热处理(渗氮、渗碳、氮碳共渗、渗硼、渗硫以及渗金属等)结合起来,能够大幅度提高钢铁零件耐磨损、耐疲劳等与表面强化有关的性能。

9.4.1 表面合金化+淬火

将零件经过表面合金化处理后,再进行直接的或再次加热淬火,可满足零件的硬韧结合、硬而不脆的淬火要求,使零件具有要求的性能。渗碳、碳氮共渗、渗氮、渗硼等均为十分重要的合金化方法,目前在汽车、机械、石油、化工、国防、航天航空等领域,表面合金化+淬火处理已经成为延长零件使用寿命与性能的重要措施与手段。

1. 渗氮(氮碳共渗)+淬火

氮碳共渗+淬火的复合处理工艺如图9-7所示,此方法用于心部也能淬透的钢,碳质量分数为0.95%~1.05%、铬质量分数为1.30%~1.65%的钢渗氮后再进行整体加热淬火和低温回火。由于表层渗入氮而使钢的 M_s 点降低,故表层冷却速度快于心部,但比心部马氏体转变要迟,这样零件表层形成了残留压应力,从而提高了零件的疲劳强度。

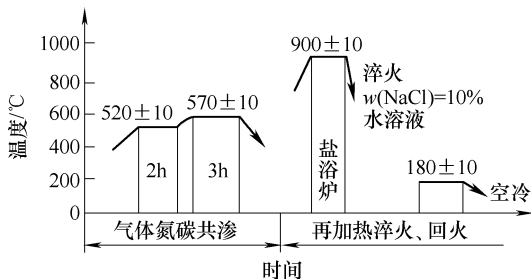


图 9-7 氮碳共渗+淬火的复合处理工艺

在加热奥氏体化的过程中,渗氮物分解后使氮原子向心部扩散固溶,淬火时零件表面形成固溶了氮、碳的马氏体,从而获得残留压应力,故提高了零件的耐磨性和疲劳强度,经过该工艺处理后材料的使用寿命可提高3~6倍。如果采用淬火+冷处理+低温回火,则将使表层的马氏体转变更充分,表层会残留更大的压应力。

2. 渗氮（氮碳共渗）+ 高频感应淬火

对调质处理后的零件进行渗氮处理，渗氮层硬而浅（一般 $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ ），如果渗氮后再进行高频感应淬火，则会使表层氮原子向心部基体扩散，有效消除渗氮白亮层，减小脆性；同时通过淬火可得到微细的含氮的马氏体，不仅提高渗氮层的深度，也使表面硬度有所提高，从而发挥坚硬的渗氮层的潜力。事实证明，与单独的氮碳共渗或高频感应淬火相比较，该复合处理可有效提高表面硬度、疲劳强度，同时增加了硬化层深度，是提高使用寿命的重要工艺方法。

3. 渗氮 + 激光熔凝

金属的激光熔凝处理可明显细化晶粒，从而提高晶界所占的体积分数，利用激光熔凝技术可使材料表面晶粒细化，进而提高晶界的活性和加速扩散速度，达到加速化学热处理过程的目的。

20 钢原始组织进行 $520^\circ\text{C} \times 12\text{h}$ 气体渗氮，经回火后在原始区渗氮层的白亮层中可以清晰地分辨出 ε 相，扩散层中为 γ' 相（ Fe_4N ）的针状组织，由针状组织的分布判断扩散层深度，如图 9-8a 所示。激光熔凝工艺改变了 20 钢的原始组织结构，产生了细板条状和针状马氏体，随后进行渗氮处理，回火后经金相观察可看见表面的白亮层 ε 相，但在激光区的截面内部却没有看到 γ' 相（ Fe_4N ）的针状组织析出，如图 9-8b 所示，原因在于激光熔凝处理后晶粒尺寸细化， γ' 相的针状组织很小，故金相观察很难确定激光区的渗氮深度。通过能谱分析检测试样截面中的氮含量，可绘出渗氮时间、含氮量与渗氮深度的关系曲线，如图 9-9 所示。20 钢激光处理区渗氮不同时间后渗氮层与扩散层的深度比较如图 9-10 所示，可以看到原始状态下的 20 钢渗氮 12h 后的渗氮深度，在激光区只需要 9h 即可达到，在过渡区渗氮 12h 的深度与基体区渗氮 15h 的深度相仿。

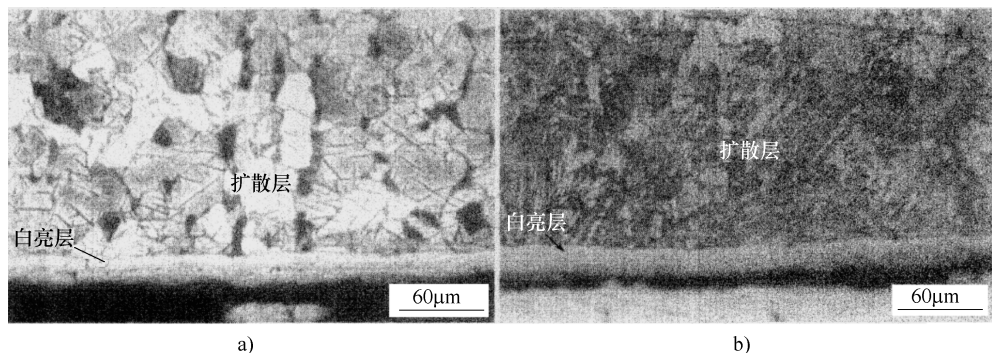


图 9-8 20 钢在不同状态下气体渗氮 12h 的金相组织

a) 原始状态 b) 激光熔凝处理

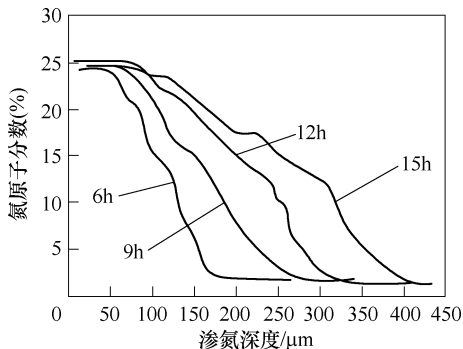


图 9-9 渗氮时间、含氮量与渗氮深度的关系曲线

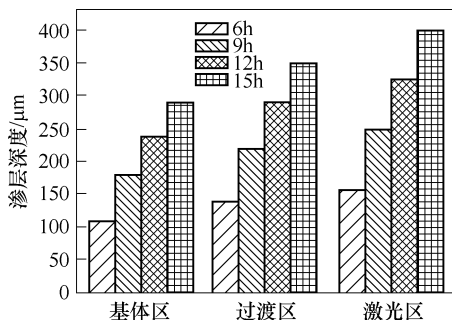


图 9-10 渗氮层深度的比较

事实表明,激光熔凝处理后渗氮的硬度比单纯激光熔凝的硬度提高 33%,耐磨性提高 2 倍,比普通气体渗氮提高 4 倍,摩擦因数比基体降低了 26%。这均源于晶粒的细化提高了氮在晶界的扩散速度,缩短了渗氮时间,使表层的氮浓度增加,形成了 γ' 相和 ε 相,提高了表面耐磨性。

4. 渗硼 + 淬火

该工艺改变了基体组织、性能及表面应力状态,避免了高硬度的蛋壳状单一渗硼层的出现,文献指出,40Cr 钢采取渗硼-空冷、渗硼-淬火-回火等复合处理工艺,渗硼复合处理后的磨损曲线如图 9-11 所示,渗硼-空冷、渗硼-淬火-高温回火后获得的基体组织分别为粗片状珠光体和回火索氏体,其硬度与强度均很低,承受压缩负荷能力较小,渗硼层易被压碎,渗硼-淬火-低温回火处理后,尽管工作表面硬度高、有压应力存在,但在负荷作用下容易萌生疲劳裂纹并扩展,只有渗硼-淬火-中温回火后获得了回火托氏体组织,硬度为 40~42HRC,硬度与强度均得到提高,同时渗硼层表面存在残留压应力,从而有效发挥了表面的耐磨性。另外电镀 + 热扩散处理也具有良好的效果。

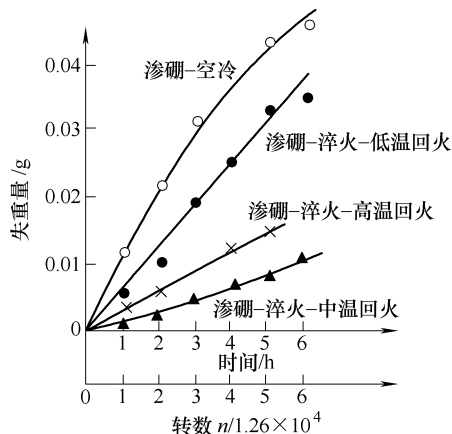


图 9-11 40Cr 钢渗硼复合处理后的磨损曲线

9.4.2 表面硬化 + 回火温度下的表面化学热处理

钢铁零件淬火后,在不同温度下对零件进行回火处理时与化学热处理(如氮

碳共渗、硫氮共渗、渗硫等)有机结合,可有效节约能源和缩短周期,从而获得优良性能的组合。

1. 表面硬化 + 在低温回火温度下的表面化学热处理

(1) 渗碳淬火 + 低温渗硫 渗碳淬火后,在回火过程中同时渗入硫原子,可提高工件表层的耐磨性和抗咬合性能,故将 180℃ 低温渗硫与低温回火合并进行。

(2) 渗氮 + 低温渗硫 渗氮后可获得极高的硬度,190℃ 低温渗硫可使工件表层兼有耐磨性与润滑性,从而具有优良的表面性能。

(3) 渗氮(氮碳共渗) + 高频感应淬火 + 低温渗硫 将低温渗硫与高频感应淬火后的低温回火工艺结合,赋予了零件高的耐磨性和耐疲劳性,同时具有强韧和减少摩擦的复合特性,从而有效发挥了硬化表层的潜力。

2. 淬火 + 在高、中温回火温度下的化学热处理

(1) 调质处理 + 氮碳共渗(硫氮共渗) 考虑到氮碳共渗与硫氮共渗温度为 520 ~ 570℃,而钢的调质处理回火温度也大多在此范围,因此可在调质处理过程中进行氮碳共渗,从而在强韧的基体上形成耐磨、耐疲劳的表面层,硫氮共渗层还具有良好的润滑性,故提高了零件的使用寿命。

(2) 分级淬火 + 氮碳共渗 将奥氏体化后的零件淬入含有活性炭、氮原子的浴槽中进行马氏体分级淬火处理,在分级保温过程中同时进行氮碳共渗。该工艺使表面形成了具有耐磨性、耐蚀性、抗疲劳性等性能的渗层,如 W6Mo5Cr4V2 刨刀经过 820℃ 预热 + 1230 ~ 1235℃ 淬火加热,在 560℃ 分级淬火并复合进行氮碳共渗,随后在该温度下回火并复合进行氮碳共渗三次,表面硬度可达到 66 ~ 68HRC,处理后该类零件的使用寿命可提高数倍。

9.5 真空热处理

9.5.1 真空热处理的发展与特点

真空热处理是指将零件置于真空热处理设备中,进行加热、保温和冷却的工艺方法,零件在负压下加热,炉内剩余的空气含量已稀薄到无法与零件进行化学反应,它是随着航天技术的发展而迅速开发出来的新技术,真空炉是近几十年来热处理设备中最具有发展前途的一种,它可替代盐浴炉、电阻炉和燃气炉。真空炉是依靠电极的辐射作用来实现工件加热的,资料介绍,辐射传热量与温度的四次方成正比,温度低时辐射加热速度比较慢,实现了缓慢加热,因此工件的内外加热较为均匀,工件的变形小。由于真空炉内气压很低,氧气的含量对工件中的铁元素氧化不起作用,因此避免了工件在加热过程中出现氧化和脱碳现象,确保零件表面的原始状态不变,工件表面清洁和光亮。由于金属氧化物在氧的分解压低或加热温度高时

发生分解，因此也可将已经发生氧化的表面除掉，恢复原来的表面状态。

经真空炉热处理后的零件表面光亮，可确保其表面的元素成分和状态不变，由于加热依靠电极的辐射来完成，因此零件加热缓慢，变形量小，尤其是对变形要求十分严格的工具、冷热作模具、小型零件、薄片状零件、不需要加工的零件等热处理的首选设备，资料介绍，高速工具钢钻头、圆板牙、拉刀、无心磨床支片等经过真空气淬后，零件的变形量为盐浴炉的 1/10 ~ 1/4，甚至可以实现成品的加工。

对高合金钢、高速工具钢、不锈钢、铁镍基合金以及部分尺寸小的低合金钢而言，其淬透性高，冷速低仍能获得要求的热处理技术要求，故采用气淬真空炉；低合金钢或工具钢、弹簧钢、滚动轴承钢等的热处理采用油淬或硝盐淬火真空炉；碳素钢、结构钢等淬透性差，这类钢材以及钛、铝合金等零件的淬火，使用水淬真空炉。

美国的海斯公司和德国的德固萨公司已经开发了水淬真空炉和硝盐淬火真空炉，实现了淬透性差的碳素钢等的真空热处理，因此从某种意义上讲，真空炉为几乎所有钢铁材料和非铁金属材料的退火、淬火、回火、化学热处理等提供了保障。真空热处理的工艺参数主要有淬火温度、真空度、淬火冷却介质、回火温度以及硬度等，在热处理过程中应根据材料、热处理技术要求、零件的形状、放置方式等进行合理地选择，尤其要注意升温速度对零件质量的影响。真空热处理与其他类型的热处理相比，具有其他热处理方法无法比拟的优点，其特点见表 9-12。

表 9-12 零件真空热处理特点

序 号	作 用	特点与应用
1	防止氧化作用， 避免氧化和烧损	氧化作用被有效抑制，表面不氧化与脱碳；省去了表面磨削加工余量；节省原材料和加工时间，表面光亮，确保零件表面的化学成分和表面状态保持不变，减少了热处理表面缺陷
2	真空脱气作用	使材料表面纯度提高，提高材料的疲劳强度、塑性和韧性，提高耐腐蚀性，显著提高合金钢的韧性，延长和提高零件的使用寿命
3	脱脂作用	除去表面残留的油脂，提高产品表面质量
4	处理工件无氢脆 危险	防止钛和难熔金属表面脆化
5	淬火畸变小	真空加热速度慢，温差小，热应力小，变形仅为盐浴淬火的1/10 ~ 1/2，工件热处理变形小，明显减少了零件的磨削加工余量（可将磨削量减少 2/3）
6	硬度高	零件真空热处理后的硬度比盐浴淬火的硬度高2 ~ 3HRC
7	节省气源	与可控气氛炉相比，不需要优质的可燃气体，同时炉子热效率高
8	工艺稳定	热处理工艺的稳定性与重复性好

(续)

序 号	作 用	特点与应用
9	节省电力	耗电少，蓄热损失小，能耗为常规热处理设备的 50%，生产成本低
10	实现自动化作业	采用了先进的计算机控制技术，在炉内完成零件的自动热处理
11	安全与环保	操作安全可靠，自动化程度高，设备本身有自锁保护功能，确保真空炉的安全操作和使用；工作环境好，炉膛洁净，实现清洁作业

一般的真空热处理工艺曲线如图 9-12 所示。

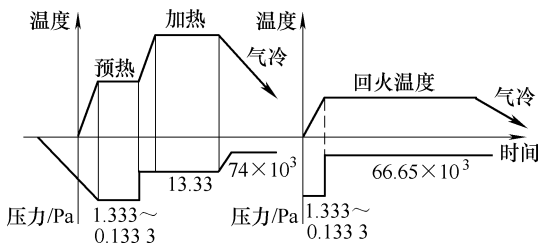


图 9-12 真空热处理工艺曲线

9.5.2 真空热处理技术的发展趋势

热处理炉一直向着新型节能的方向发展，设备的性能很大程度上取决于加热元件（包括电极辐射和燃气辐射的质量）、炉内耐热构件、传输运动部件、高温风扇及炉子的密封性等。设备节能和密封性好才能提高炉温的均匀性，大力推广真空炉，减少零件的氧化和脱碳，不断改善工作条件和劳动条件，提高零件的使用寿命，实现设备的机械化和现代化操作，真空热处理技术的发展趋势见表 9-13。

表 9-13 真空热处理技术的发展趋势

具体技术和装置	第一代情况	第二代情况	第三代现状	未来的发展趋势和努力方向
加热技术	真空辐射	真空辐射，负压或载气加热	负压或载气加热，低温正压对流加热	低温正压对流加热，提高加热的效率，实现真空局部加热
冷却技术	负压冷却，加压冷却	加压冷却（ $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ），高压冷却（ $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ）	高压冷却（ $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ），增压冷却（ $1 \sim 2 \text{ MPa}$ ）	氢气、氦气、氮气混合冷却技术，气体回收技术等
炉体结构	开放型	开放型	密闭型	密闭型结构推广

(续)

具体技术和装置	第一代情况	第二代情况	第三代现状	未来的发展趋势和 努力方向
炉床结构	陶瓷毡、石墨毡	硬质预制	高强度碳质材料	高强度碳质整体结构
进、出料机构	台车、吊车或 吊架式	分叉式机构	进出辊底式 结构	各种形式的无人操作 形式
自动控制	元件手动, PID 温控, 继电器控 制动作	多采用 PID 温 控、PC 单 板 机 控制	智能化仪表 + PC 单板机控制	可存储多种工艺, CRT 显示器可实现一台 或多台群控

9.5.3 真空热处理工艺与应用

真空炉的选用应根据具体的工艺要求而定, 目前真空退火炉、真空淬火炉、真空回火炉、真空烧结炉等已经批量应用。金属材料在真空中加热既可避免氧化, 又能脱气、脱脂等, 下面介绍其应用情况。

1. 真空退火

真空退火除用于钢、铜及其合金外, 也可用于与气体有亲和力的金属如钛、钽、铌等的退火, 真空退火时应根据金属的氧化特性选择真空度, 避免合金中的化合物分解与脱溶等。需要注意的是真空退火的零件必须进行清洗、脱脂和烘干处理, 否则在加热过程中容易产生氧化、腐蚀、脱碳和渗碳等缺陷。

真空退火的脱气效果取决于加热温度、时间和真空度等工艺参数, 另外, 还与气体以及金属化合物的物理性质有关。各种金属材料真空退火的工艺参数见表 9-14。

表 9-14 各种金属材料真空退火的工艺参数

材料类别	材料名称或钢号	退火温度/℃	真空度/Pa	说明或注意事项
钢	45	850 ~ 870	0. 133 ~ 1. 33	炉冷或气冷至 300℃ 左右出炉
	40Cr	890 ~ 910	0. 133	炉冷或气冷至 200℃ 左右出炉
	Cr12MoV	850 ~ 870	≥0. 133	缓冷至 300℃ 左右出炉
	W18Cr4V	870 ~ 890	0. 133	720 ~ 750℃ 等温 3 ~ 4h 炉冷
	铁素体不锈钢	630 ~ 830	0. 133 ~ 1. 33	气冷或缓冷
	马氏体不锈钢	830 ~ 900	0. 133 ~ 1. 33	气冷或缓冷
	奥氏体不锈钢	1000 ~ 1050	0. 133 ~ 1. 33	快冷
	9SiCr、9Mn2V、 CrWMn	780 ~ 850	1. 333	缓冷
	5CrNiMo、5CrMnMo	820 ~ 870	1. 33	缓冷

(续)

材料类别	材料名称或钢号	退火温度/℃	真空度/Pa	说明或注意事项
铜	纯铜	650 ~ 750	13. 3	小尺寸选退火温度的下限，大尺寸选退火温度的上限； 黄铜要充惰性气体以及防止锌蒸发
	黄铜	650 ~ 750	(光亮退火)	
	铝青铜	650 ~ 750	13. 3	
	锡青铜	600 ~ 700	(除气退火)	
	铜丝	250 ~ 500	270 ~ 670	
难熔金属及合金	钼及合金	1100 ~ 1400	133.3×10^{-5}	防止钼吸氢形成脆性
	钛及合金	700 ~ 800	133.3×10^{-5}	注意除氢
	钽及合金	1200 ~ 1400	133.3×10^{-5}	防止钽的氧化和吸氢
	锆及合金	700 ~ 750	133.3×10^{-5}	防止氢脆
	钨及合金	1100 ~ 1500	133.3×10^{-5}	防止氧化
	铌及合金	1300 ~ 1400	133.3×10^{-5}	防止氧化
	坡莫合金	900 ~ 1200	133.3×10^{-5}	

2. 真空淬火及回火

该类工艺的参数有真空度、加热温度、保温时间、淬火冷却介质等，应根据工件的材质与性能要求来合理选择与确定。

(1) 真空度的选择 为了防止工件表面氧化、脱碳以及合金元素蒸发造成工件性能降低与炉膛污染等，应正确选择真空度。合金元素锰、铝、钴、铬、镍等的饱和蒸气压较高，容易在加热过程中蒸发，真空度不宜太低；钛的饱和蒸气压较铬、锰等略低，在较低的压力下容易向表面聚集；而钨、钒、硅、钼等元素的饱和蒸气压低，不容易蒸发。

通常将钢的淬火加热温度分为高温与中温两类，中温为 900℃ 以下，高温则分为 900 ~ 1100℃ 和 1100 ~ 1300℃，不同温度范围内的真空度是有差异的。表 9-15 为几类钢预热、淬火加热及回火真空度的选择情况。

表 9-15 几类钢预热、淬火加热及回火真空度的选择情况

钢 种	预热真空度 /Pa	淬火加热真空度/Pa	回火加热真空度/Pa	其 他
弹簧钢	0. 133 ~ 1. 33	1. 33 ~ 13. 3	先降至 1. 33Pa，升至回火温度 (380 ~ 460℃) 后回充氮气至 133. 3Pa，回火后在惰性气体中强制冷却	
轴承钢	0. 133 ~ 1. 33	1. 33 ~ 13. 3	—	空气炉低温回火

(续)

钢 种	预热真空度 /Pa	淬火加热 真空度/Pa	回火加热 真空度/Pa	其 他
合金工具钢如 9SiCr、CrWMn、 9Mn2V、5CrNiMo	0.133 ~ 1.33	0.133 ~ 1.33	—	低温回火
高碳高铬钢如 Cr12、Cr12MoV	0.133 ~ 1.33	1.33	—	—
高合金钢如 3Cr2W8V、4Cr5W2VSi	0.133 ~ 1.33	1.33 ~ 13.3	—	—
高速工具钢如 W18Cr4V、W6 Mo5Cr4V2	0.133 ~ 1.33	13.3	133.3 (380 ~ 500℃)	—
不锈钢与耐热钢	—	0.133 ~ 1.33		
高温合金如 GH4037 ~ GH1140	0.133 ~ 1.33	0.0133 ~ 0.133		

- 注：1. 高速工具钢在 1050℃ 左右加热时，应向炉内回充高纯度的氮气，使真空度控制在 13.3Pa，以防止合金元素的蒸发。
2. 铬镍奥氏体不锈钢和耐热钢板和钢带热处理时，应采用高纯度的氩气来进行分压和冷却。
3. 对于轴承钢与弹簧钢，为防止 Cr、Mn 元素的挥发，要严格控制真空度。

(2) 淬火加热温度的选择 通常淬火加热温度取盐浴炉和空气加热炉的下限，淬火加热温度在 900℃ 以下时，采用 500 ~ 600℃ 一次预热，加热温度高于 1000℃ 时，一般采用两次预热，即 500 ~ 600℃ 和 800 ~ 850℃。

(3) 淬火加热保温时间的确定 考虑到真空加热以辐射为主，加热速度慢，通常认为真空加热时间为盐浴炉的 6 倍，为空气炉的 2 倍，真空保温时间 $C = KB + T$ ，其中 K 为保温时间系数（表 9-16）， B 为工件的有效厚度， T 为时间余量（表 9-16）。

表 9-16 真空淬火保温时间的 K 、 T 值（供参考）

材 料 类 别	淬火保温时间计算		备 注
	保温时间系数 $K/(min/mm)$	时间余量 T/min	
碳素钢	1.6	0	560℃ 预热一次
碳素工具钢	1.9	5 ~ 10	560℃ 预热一次
合金工具钢	2.0	10 ~ 20	560℃ 预热一次
高合金工具钢	0.48	20 ~ 40	560℃ 预热一次 800℃ 预热一次
高速工具钢	0.33	15 ~ 25	560℃ 预热一次 850℃ 预热一次

(4) 淬火冷却介质的选择 常用的真空淬火冷却介质有真空淬火油、高纯氮气等，应根据具体的材料与性能要求来合理选择，通常而言，模具材料如高合金钢和高速工具钢等才进行真空淬火处理，其选用的淬火冷却介质为真空淬火油，该类油具有饱和蒸气压低、临界压强低、化学稳定性好等特点，故获得了广泛的应用。通过提高冷却气体的密度（压力）和流速，可以正比增大对流传热效率，使淬火冷却速度加快，从而提高真空气淬炉的冷却能力。

(5) 真空回火 一般而言，250℃ 以下的低温回火是在空气炉或低温硝酸盐浴中完成的，260 ~ 750℃ 的回火则可在保护气氛炉或真空炉中进行，在真空回火炉中回火时，应将工作室抽至 0. 133 ~ 1. 33Pa，然后充入高纯氮气，进行回火处理。

9.5.4 影响工件真空热处理质量的因素

影响工件真空热处理质量的因素见表 9-17。

表 9-17 影响工件真空热处理质量的因素

影 响 因 素	主 要 内 容
真空炉质量	真空炉有一定的极限真空度、泄漏率（压升率）与炉温均匀性
前处理	机械加工后工件应进行表面脱脂处理，以免污染真空加热室和影响工件的表面处理质量
装炉方式	真空加热靠温度辐射，装炉时应注意工件的整齐排列，并尽量避免相互遮挡
真空度	对含挥发元素的钢或合金加热时，真空度不宜过高，可通入高纯惰性气体至 1 ~ 2kPa
加热温度	真空淬火的加热温度一般取盐浴炉或空气炉加热时的下限。真空回火、真空退火、真空固溶处理及真空时效处理的加热温度，一般与常规处理时的加热温度相同，工件达到预定加热温度前需要预热
保温时间	真空淬火加热的保温时间一般比盐浴炉的加热时长 3 ~ 6 倍，比空气炉长 1 倍；真空回火加热的保温时间略长于空气炉加热时的保温时间，比硝酸盐炉长 1 ~ 2 倍；真空退火加热的保温时间一般比空气炉长 1 倍
淬火冷却方式与 淬火冷却介质	一般合金结构钢与工具钢真空加热后进行油淬。高速工具钢和冲模在油冷时易渗碳，应进行气体冷却。工模具截面较大或装炉量过多时，需要进行高压气淬。真空加热后还可在盐浴中等温或分级淬火，也可水淬
变形	真空炉加热靠辐射完成，加热缓慢，工件内外温差小，变形明显小于盐浴加热

9.5.5 典型零件的真空热处理

1. 模具的典型真空热处理工艺

模具经过真空热处理后，具有表面清洁、光亮、变形小等特点，故具有高的使用寿命，事实证明采用真空处理的模具，其寿命比盐浴炉、可控气氛炉等处理的至少提高 50%。表 9-18 为部分模具材料的真空热处理工艺参数。

表 9-18 部分模具材料的真空热处理工艺参数

材 料 牌 号	预 热		淬 火			回火 温度/℃	硬度 HRC
	温度/℃	真空度/Pa	温度/℃	真空度/Pa	淬火冷却介质		
9SiCr	500 ~ 600	0. 1	850 ~ 870	0. 1	油	170 ~ 190	61 ~ 63
CrWMn	500 ~ 600	0. 1	820 ~ 840	0. 1	油	170 ~ 185	62 ~ 63
9Mn2V	500 ~ 600	0. 1	780 ~ 820	0. 1	油	180 ~ 200	60 ~ 62
5CrNiMo	500 ~ 600	0. 1	840 ~ 860	0. 1	油或高纯氮气	480 ~ 500	39 ~ 44
3Cr2W8V	480 ~ 520	0. 1	1050 ~ 1100	1 ~ 10	油或高纯氮气	560 ~ 580	42 ~ 47
	800 ~ 850					600 ~ 640	39 ~ 44
4Cr5W2SiV	480 ~ 520 800 ~ 850	0. 1	1050 ~ 1100	1 ~ 10	油或高纯氮气	600 ~ 650	38 ~ 44
7CrSiMnMoV	500 ~ 600	0. 1	880 ~ 900	0. 1	油或高纯氮气	450 ~ 200	52 ~ 54 60 ~ 62
H13	500 ~ 550 800 ~ 820	0. 1	1020 ~ 1050	1 ~ 10	油或高纯氮气	560 ~ 620	45 ~ 50
Cr12	500 ~ 550	0. 1	960 ~ 980	1 ~ 10	油或高纯氮气	180 ~ 240	60 ~ 64
Cr12MoV	500 ~ 600	0. 1	980 ~ 1050	1 ~ 10	油或高纯氮气	180 ~ 240	60 ~ 64
	800 ~ 850		1080 ~ 1120			500 ~ 540	58 ~ 60
W6Mo5Cr4V2	500 ~ 600	0. 1	1100 ~ 1150	10	油或高纯氮气	200 ~ 300	58 ~ 62
	800 ~ 850		1150 ~ 1250			540 ~ 600	62 ~ 66

文献指出，9SiCr、Cr12MoV 钢制 M12 螺栓切边模常见的失效形式为切向开裂、崩刃、磨损、孔变形等，使用寿命仅为 10 000 余件，而采用 6Cr5Mo3W2VSiTi（LM2）钢制造切边模并经过真空热处理后，使用寿命提高 5 ~ 7 倍。Cr12MoV 钢制搓丝板 980℃ 预热、1050℃ 淬火加热油冷后，在 170℃ 回火 2 次，每次 90min，与盐浴炉处理的搓丝板相比，其畸变明显减小。Cr12MoV 钢制搓丝板真空与盐浴热处理后的畸变见表 9-19，Cr12MoV 钢制搓丝板真空热处理后的使用寿命见表 9-20。

表 9-19 Cr12MoV 钢制搓丝板真空与盐浴热处理后的畸变

热处理方法	淬火前畸变量/mm		淬火、回火后畸变量/mm		净畸变量/mm	
	宽度方向	长度方向	宽度方向	长度方向	宽度方向	长度方向
真空淬火	0. 01 ~ 0. 02	0. 015 ~ 0. 03	0. 01 ~ 0. 02	0. 01 ~ 0. 02	0 ~ 0. 01	0. 005 ~ 0. 02
盐浴淬火	0. 01 ~ 0. 02	0. 01 ~ 0. 03	0. 03 ~ 0. 07	0. 03 ~ 0. 05	0. 01 ~ 0. 06	0 ~ 0. 03

表 9-20 Cr12MoV 钢制搓丝板真空热处理后的使用寿命

规格或型号	螺 栓 材 料	使用寿命/万件
M6	1Cr18Ni9Ti	4.91
M8	35 钢以上的高强度材料	55
M10		64
M12		23
M12 牢配	40Cr 调质处理, 28 ~ 31HRC	4.4 ~ 5.5
5/16-18UNC-2A	普通钢	60.3
10-24UNC-2A		76

2. 65Mn 钢薄片弹簧支架的真空热处理工艺

0.3mm 厚 65Mn 弹簧片是电视机上用于选择频道的按键支架, 其热处理的最大问题是淬火变形, 采用电炉、盐浴炉均不能满足要求。采用真空热处理工艺, 其工艺曲线如图 9-13 所示。在 680℃ 预热 (相变点附近), 升温速度缓慢, 受热均匀, 应力小, 经过预热、淬火保温移至冷却室油冷, 为了减小变形, 不开启淬火油搅拌系统, 延长蒸汽膜阶段。需要注意的是, 对于这种薄而细长的弹簧片而言, 真空热处理前的预应力即装夹状态对热处理后的变形影响很大, 加热与冷却过程中, 自重、相互挤压力不均甚至振动等都会导致变形, 因此应设计专用夹具 (图 9-14), 保证各弹簧片之间以及弹簧片与夹具之间紧贴, 受力均匀, 有效控制热处理变形。

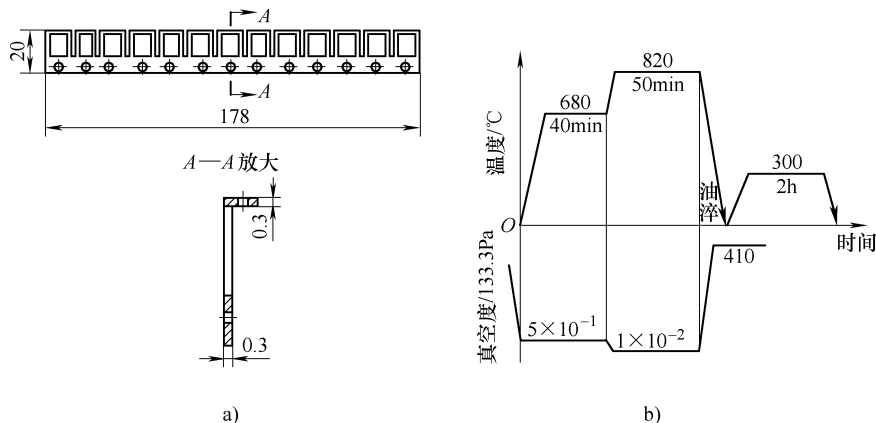


图 9-13 0.3mm 厚 65Mn 弹簧片及其真空热处理工艺曲线

a) 形状尺寸 b) 真空热处理工艺曲线

3. W18Cr4V 钢轧压辊的真空热处理工艺

纺织印染机铜芯钢模的辊压模采用 W18Cr4V 钢制造, 要求硬度为 62 ~ 64HRC, 从其工作状态来看, 辊压模应进行无氧化加热, 为确保牙型符合要求, 应

采用真空热处理。W18Cr4V 钢轧压辊工作状态与真空热处理工艺如图 9-15 所示。其真空热处理工艺为 850℃ 预热，1280℃ 加热，保温结束后油淬，模具入油后立即通入氮气，需要注意的是为确保辊压模的表面不产生白亮层，淬火前应采取适当的预冷措施，预冷时间应根据模具的大小、装炉量等确定。

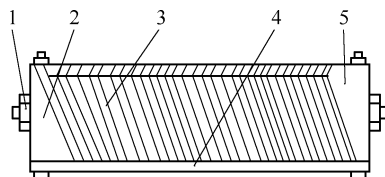


图 9-14 弹簧片装夹示意图

1—固定螺栓 2—上斜铁 3—弹簧片
4—底板 5—下斜铁

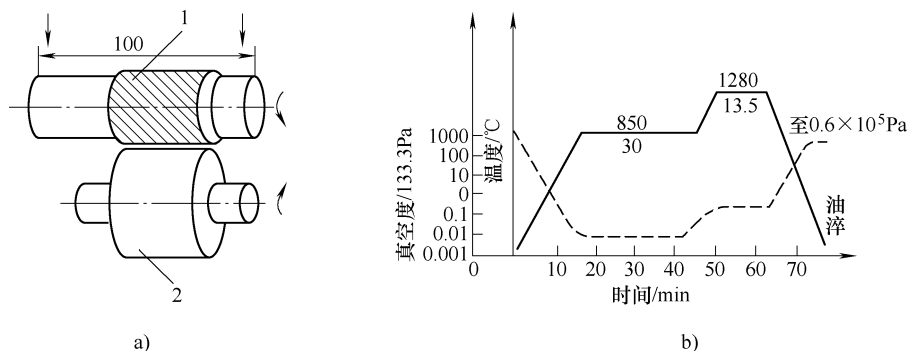


图 9-15 W18Cr4V 钢轧压辊工作状态与真空热处理工艺

a) 轧压辊工作状态 b) 真空热处理工艺

1—辊压模 2—模芯（工件）

4. H13 钢气门热锻模的真空热处理工艺

根据气门锻模的技术要求，锻模采用真空热处理是最为合理的。通常锻模的真空热处理工艺路线为：汽油清洗锻模→装筐→500 ~ 550℃ × 90min 一次真空预热→800 ~ 850℃ × 60min 二次真空预热→1120 ~ 1140℃ × 40min 真空淬火加热与充氮→淬火冷却→热水清洗→590 ~ 610℃ × 240min 二次真空高温回火→质量检验。

采用真空淬火与回火后锻模的硬度为 49 ~ 53HRC，整体呈银灰色，型腔变形量为 0.03 ~ 0.05mm，满足了尺寸要求，实践证明，经过真空炉高温处理的锻模使用寿命比低温处理的寿命提高 3 ~ 10 倍，比盐浴处理的提高 2 ~ 3 倍。

H13 钢锻模合金元素总量比 3Cr2W8V 钢少，1050℃ 的淬火加热温度不能充分发挥 H13 钢材料的性能，通过提高淬火温度可提高奥氏体的含碳量及合金化程度，高温回火马氏体的分解、晶粒再结晶、长大和碳化物的析出、聚集、粗化过程将被推迟并减慢，故确保了锻模具有更高的稳定性。

H13 钢锻模受到强烈的冲击，对锻模的热稳定性要求较高，并且要求有高的硬度和良好的耐磨性，将加热温度提高到 1140℃ 左右使尽可能多的碳化物溶解到奥氏体中，可使锻模保持高的硬度和热硬性以及足够的强度。

H13 钢锻模宜采用热油进行淬火，否则会造成冷却不充分而降低基体的硬度，

容易造成热磨损与型腔塌陷,当基体硬度低于35HRC时,无法保证正常的服役需要。

参考文献

- [1] 李书常. 简明典型金属材料热处理实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 马伯龙, 王建林. 实用热处理技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 王忠诚, 齐宝森, 李扬. 模具热处理实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [4] 潘邻. 表面改性热处理技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] 曾珊琪, 丁毅. 模具寿命与失效 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] 孙希泰, 等. 材料表面强化技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 国家机械工业委员会. 高级热处理工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [8] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉. 热处理工程师手册 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 雷廷权, 傅家骥. 金属热处理工艺方法500种 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 李有才. 模具材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [11] 陈志刚. 模具失效与维护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] 李泉华. 热处理实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [13] 李慕勤, 李俊刚, 吕迎, 等. 材料表面工程技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [14] 林信智, 杨连第. 汽车零部件感应热处理工艺与设备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [15] 李奇. 模具材料与热处理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [16] 王德文. 提高模具寿命应用技术实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [17] 模具实用技术丛书编委会. 模具材料与使用寿命 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册: 第1卷 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [19] 曾祥模. 热处理炉 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
- [20] 热处理手册编委会编. 热处理手册: 第3卷 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [21] 许天已, 王忠诚. 钢铁零件制造与热处理100例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [22] 赵步青. 工具处理工艺400例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [23] 王忠诚, 孙向东. 汽车零部件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [24] 吉泽升, 张雪龙, 武云启. 热处理炉 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1999.
- [25] 樊新民. 热处理工实用技术手册 [M]. 2版. 南京: 江苏科学技术出版社, 2010.
- [26] 刘仁家. 真空热处理与设备 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1984.
- [27] 包耳, 田绍洁. 真空热处理 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009.
- [28] 王忠诚. 热处理操作简明手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [29] 姚艳书, 唐殿福. 工具钢及其热处理 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009.
- [30] 赵昌盛. 不锈钢的应用及热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

第 10 章

汽车零部件先进热处理设备



10.1 概述

10.1.1 热处理设备的分类与特性

热处理设备是完成零件热处理操作的重要工艺装备。随着对零件技术要求的提高，对设备的性能和技术指标有了更严格的规定，首先热处理设备要确保工艺参数的实现，其次要求操作简单、减轻体力劳动、易于实现机械化或自动化、生产率高，再次要求节能降耗、环保。这些是选择设备和使用设备进行零件热处理时必须要考虑的问题。

热处理设备的种类很多，应根据零件材料和设计要求来选用相应的设备。热处理设备主要分为加热设备、冷却设备、辅助设备等几大类，见表 10-1。

表 10-1 常见热处理设备分类

序号	设备类别		炉型或装置	典型设备
1	加热设备	热处理加热炉	电阻炉	箱式电阻炉、台车炉、井式炉、推杆炉、振底炉等
			盐浴炉	电极盐浴炉、坩埚炉等
			燃料炉	煤气（天然气）炉、液体燃料炉、煤炭炉等
			连续式保护气氛炉	有炉罐连续淬火炉、无炉罐连续淬火炉等
			可控气氛炉	氮气氛加热炉、甲醇裂解气氛加热炉、氮气 + 甲醇裂解气氛加热炉等

(续)

序号	设备类别		炉型或装置	典型设备
1	加热设备	热处理加热炉	流态床炉	各种（煤气、天然气、液化气等）流态床炉等
			真空炉	油淬真空炉、气淬真空炉、水淬真空炉等
		热处理加热装置	感应加热装置	高频、超音频、中频、工频等
			火焰加热装置	
			电阻加热装置	
			接触电阻加热装置	
			激光及电子束加热装置	
			离子渗氮装置	离子渗氮炉
2	冷却设备或装置	缓冷设备	冷却坑或罐、冷却井、热处理炉等	
		中速冷却设备	硝盐浴槽、低温盐浴炉等	
		快速冷却设备	淬火油槽、淬火水槽、淬火机床、冷却成形设备等	
		冷处理设备	冷冻机	
		淬火冷却介质循环冷却设备	风冷机、水冷机、冷却水套或冷却塔等	
		淬火冷却介质冷却储存设备	大型油槽、油罐等	
3	表面清洗、清理与表面处理设备	清洗设备	机械清洗设备	一般清洗机、超声波清洗机、真空清洗设备、化学脱脂清洗设备等
			人工清洗设备	热水煮沸槽、碱水煮沸槽等
			酸洗设备	盐酸槽等
		喷砂、喷丸与抛丸设备	喷砂、喷丸设备	转盘式喷砂机、自动或手动喷丸机等
			抛丸设备	滚筒式、履带式、吊钩式、连续式等
		发蓝、蒸汽、磷化处理设备	发蓝设备	发蓝槽等
			蒸汽处理设备	蒸汽加热炉
			磷化处理设备	磷化槽等

本章主要围绕汽车零件进行热处理所用的热处理设备进行介绍，根据使用目的与要求的不同，重点介绍真空热处理炉、连续式保护气氛炉、燃气高温炉、感应加热设备、流动粒子炉、离子渗氮炉等。

10.1.2 汽车零件对热处理设备的要求

1. 零件热处理的要求与设备的选择

产品的热处理质量是通过选用合适的热处理设备、加热介质、加热温度和保温时间以及冷却方法来保证的，工艺参数的合理选择是达到热处理要求的最为重要的措施。选择热处理设备的一般原则如下：

- 1) 要求表面光亮、无氧化脱碳、表面粗糙度值低的精密零件等推荐采用真空炉、保护（或可控）气氛炉和流动粒子炉等。
- 2) 长轴、薄片状零件等应首选盐浴炉、多用炉以及井式电阻炉进行加热。
- 3) 大批量作业的应采用机械化或自动化程度高的连续式热处理炉（包括网带炉、振底炉等），而品种多数量少的采用万能的小型保护气氛炉。
- 4) 锻造后进行退火、去应力退火等的毛坯，通常选择在普通箱式电阻炉中加热，普通箱式电阻炉一般用于加工余量比较大的产品。
- 5) 工具与模具等产品的淬火加热，最好在盐浴炉或真空炉中进行，一是满足表面加工余量小与变形小的要求；二是表面无氧化脱碳，可提高其使用寿命；三是质量得到有效保证。
- 6) 要求表面硬化的零件可进行高频感应淬火、火焰淬火或激光淬火等。
- 7) 要求渗层浅、变形量小、表面硬度高、耐磨性好的零件，应进行渗氮、氮碳共渗、离子注入和气相沉积等处理。

2. 热处理设备的发展方向

随着热处理的基础理论研究和热处理新工艺、新技术的不断进步，我国热处理领域缩小了与工业发达国家的差距。但在热处理生产水平、质量控制以及热处理设备方面仍存在较大的差距，还没有根本扭转汽车零件热处理设备落后、氧化脱碳、质量差、生产率低、能耗大、成本高、污染严重等局面，大力推广先进的热处理新技术、新工艺、新材料、新设备，用高新技术改造传统的热处理技术，满足零件热处理“优质、高效、节能、降耗、无污染、低成本、专业化、清洁生产”的要求，是汽车零件热处理的发展方向，具体内容如下：

- 1) 设计先进的自动化与连续化热处理设备，实现加热的少、无氧化脱碳，保持零件表面成分的稳定。
- 2) 实现零件热处理前后清洗的自动化作业，确保炉内加热气氛的稳定，实现清洁生产和零污染。
- 3) 实现精确生产和零畸变，发展低成本、低能耗、高效率的自动化感应加热设备。
- 4) 研发零件热处理后免清洗的加热介质或冷却介质，实现热处理过程水的无污染、零排放。

- 5) 智能化的温控系统与炉内气氛的计算机自动控制。
- 6) 化学热处理的低温化与自动化作业。
- 7) 加热设备余热的回收利用。
- 8) 开发节约能源的设备和工艺。

10.2 真空热处理炉

10.2.1 真空炉的发展概况

真空炉是随着航空航天技术的发展而开发的热处理设备。国外自 20 世纪 40 年代开始研制真空炉, 开始批量投入使用是在 20 世纪 60 年代以后。真空炉是近几十年来在热处理领域最具有发展前途的一种设备, 它可替代盐浴炉、电阻炉和燃气炉等。真空炉是依靠电极的辐射作用实现对工件的加热的, 辐射加热速度比较慢, 因此工件的内外加热较为均匀, 工件的变形小。同时避免了工件加热过程中出现氧化和脱碳现象, 保持了工件表面的原始状态, 工件清洁和光亮。图 10-1 所示为淬火及渗碳两用双室卧式真空炉。

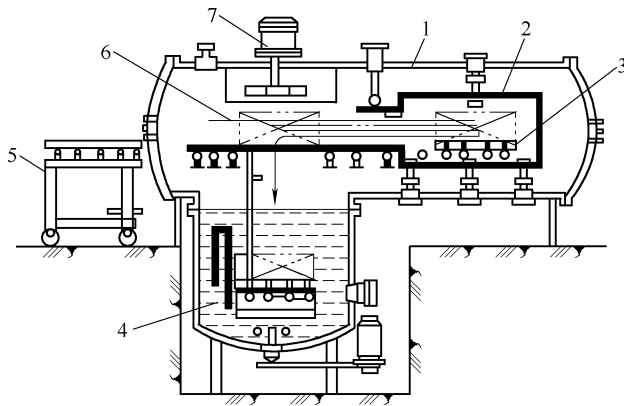


图 10-1 淬火及渗碳两用双室卧式真空炉

1—炉壳 2—加热室 3—拖车 4—气冷室 5—手推车 6—淬火油槽 7—电风扇

我国汽车零部件行业自 20 世纪 80 年代初, 开始推广使用真空炉, 到 90 年代全国汽车零部件厂均拥有一台以上真空炉 (包括淬火炉和回火炉等)。真空炉不仅用于普通工件的淬火、回火、退火和正火, 而且可进行化学热处理, 如真空渗碳 (包括真空碳氮共渗)、真空离子渗碳和辉光离子渗氮等, 同时可完成金属的烧结、钎焊和真空镀膜等。真空渗碳具有渗层均匀、重现性好、表面清洁光亮和消耗气体少的优点。

10.2.2 真空炉的种类、特点、应用及主要技术参数

1. 真空炉的分类

根据炉内真空度的高低不同,真空炉分为低真空、中真空和高真空三种。通常使用的为中真空和高真空状态,真空度分别为 $0.133 \sim 1.33\text{Pa}$ 和 $1.33 \times 10^{-3} \sim 1.33 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。

按照真空炉冷却时使用的冷却介质不同,真空炉可分为油冷真空炉、气淬-油冷真空炉、硝酸盐浴真空炉、水淬真空炉以及气冷真空炉几种;按结构形式分为单室、双室、三室和连续作业炉等。

(1) 外热式真空炉 该类真空炉结构简单,炉罐不需要水冷,故称为热壁真空炉,零件放在已抽成真空的炉罐中,从外部间接加热。图 10-2 所示为外热式油淬真空热处理炉。该类真空炉的特点如下:操作维修方便,造价低;炉罐内无电热元件和隔热材料等,易于清理,容易获得真空;无气体放电和其他安全隐患,可靠性好。

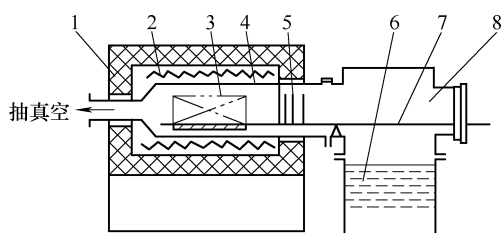


图 10-2 外热式油淬真空热处理炉

1—炉体 2—电热元件 3—工件 4—真空罐 5—隔热屏 6—淬火油槽 7—传动机构 8—冷却室

(2) 内热式真空炉 内热式真空炉依靠内部电阻加热,其加热元件、隔热屏、炉床和其他构件等均装在加热室内,依靠电极的热辐射实现对零件的加热。电热元件在炉膛的中部构成一个加热区,确保零件的均匀加热,在加热元件的外部装有金属辐射屏或非金属隔热屏,炉床在加热区的中央。内热式真空炉的种类和形式很多,占国内外真空炉数量的 80% 以上,常用于退火、淬火、回火、烧结和钎焊等。同外热式真空炉相比,具有以下特点:炉子的热惯性小,加热速度和冷却速度快,热效率与生产率较高;无耐热炉罐,故炉膛与容量不受限制,炉内可达到更高的温度;炉温的均匀性好,可达 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,因此工件受热均匀,零件的变形小;零件加热期间不需要通入保护气体,提高了加热元件的使用寿命;炉内结构复杂,加热区受到一定的限制;炉体体积大,需要配备的真空系统的容量要增大。

目前国内双室真空炉的型号有 ZC 系列、WZ 系列、VCQ 系列等;单室气淬炉有 VFC 系列、VVFC 系列、HPV 系列高压气淬系列等。它们具有各自的加热和冷却特点,技术已经成熟,得到使用厂家的认可和肯定。图 10-3 所示为内热式真空炉常见炉型。

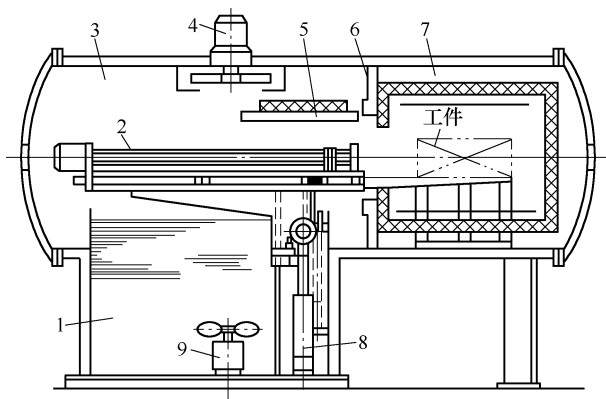


图 10-3 ZC2 系列内热式真空炉

1—淬火油槽 2—水平移动机构 3—整体式炉体 4—气冷风扇 5—翻板式中间门
6—中间墙 7—加热室 8—升降机构 9—油搅拌器

2. 真空炉的特点

真空炉与其他热处理炉相比，具有以下优点：

- 1) 设备自动化程度高，完全实现机械化操作，设备本身有自锁功能，保护真空炉的安全使用。
- 2) 炉膛洁净，工件热处理变形小，仅为盐浴变形量的 $1/10 \sim 1/4$ ，减少了零件的磨削加工余量。
- 3) 具有除气和脱脂作用，显著提高了工件的力学性能，延长了零件的使用寿命。
- 4) 节省电力和能源，蓄热损失小，污染气氛低于其他任何的保护气氛炉，无公害，操作安全可靠，工作环境好。
- 5) 工件无氧化、脱碳，表面光亮，确保零件表面的化学成分和表面状态保持不变，减少了热处理表面缺陷，生产成本低。
- 6) 零件无氢脆的危险。

3. 真空炉的应用

真空炉在我国的发展时间不长，由于生产成本低和一次性投资大，因此其应用的范围也受到一定程度的限制。在国外工业发达国家真空炉的数量在 23% 以上，与可控气氛炉基本相当，发展很快，自动化程度和工艺水平更高，几乎可以实现金属材料的全部热处理工艺，如淬火、回火、退火、渗碳、渗氮、渗金属等热处理工艺，完成气淬、油淬、硝酸盐淬火和水淬等淬火处理。真空炉及其应用情况见表 10-2。

表 10-2 真空炉及其应用情况

使用范围		真空炉类别及特点	处理的材料	应用实例
真空热处理	退火、正火、固相除气	有炉罐或无炉罐真空炉	Cu、Ni、Be、Cr、Ti、Zr、Nb、Ta、W、Mo	电气材料、磁性材料、弹性材料、高熔点金属、活泼金属等
	淬火、回火	内部具有强制冷却装置的真空炉	高速工具钢、工具钢、轴承钢、高合金模具钢等	工模具、夹具、量具、轴承和齿轮等机械零件
真空烧结、焊接、压接	烧结	感应烧结真空炉、电阻烧结真空炉等	W、Mo、Ta、Nb、Fe、Ni、Be、TiC、WC等	超硬质合金、高熔点金属材料 and 粉末冶金零件等
	钎焊	电阻真空炉、感应真空炉	铝、不锈钢、高温合金	飞机零件、火花塞等使用的不锈钢、高温合金零件的钎焊等
	压接	电阻真空炉、感应真空炉	碳素钢、不锈钢	
表面处理	化学气相沉积	电阻加热、感应加热、电子束加热	金属及其碳化物、硼化物等沉积于金属或非金属基体上	工具、模具、汽轮机叶片、飞机零件、火箭喷嘴等
	物理气相沉积	电阻加热、感应加热、电子束加热	金属、合金、化合物等沉积于金属、玻璃、陶瓷、纸张等上	各种材料的真空涂（镀）膜制品，部分工具和模具的表面超硬处理等
	离子渗碳	离子渗碳炉	碳素钢、合金钢	齿轮、轴类和各种销子等机械零件
	离子渗氮	离子渗氮炉	合金钢、球墨铸铁	齿轮、轴类和工模具等机械零件

对工模具钢而言，在真空炉内加热时，减少了辐射换热，加热速度缓慢，零件各部分受热均匀，因此变形量很小。冷却后的零件表面处于压应力状态，故零件具有良好的综合力学性能，疲劳强度和抗拉强度明显提高，使用寿命比普通盐浴炉处理的零件提高2~10倍。

耐热钢、不锈钢等零件经真空退火后，表面光洁，提高了零件表面的耐蚀性和对晶粒间腐蚀的抵抗能力；另外，可实现真空堆焊、软化退火、真空镀膜等。这是其他热处理设备是无法比拟的。

高强度螺栓等重要零件的材料为30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A，经过真空热处理后，抗拉强度提高，而塑性和韧性没有发生明显的变化，断裂韧度降低而低温的冲

击韧度较高。疲劳强度提高 100 倍以上,冲击磨损和低温拉伸寿命分别提高 1.5 ~ 2.4 倍和 1.6 ~ 3.5 倍,显示了真空热处理的优点。

4. 真空炉的主要技术参数

真空炉的各项技术指标与其他热处理设备有相似之处,但因其炉膛必须能承受负压的作用,并能保证加热零件无氧化、脱碳,因此有些技术要求相对比较严格,主要技术参数归纳如下。

- ① 额定功率 (kW) 和电压 (V)。
- ② 电极相数。
- ③ 炉膛的有效加热区尺寸 (mm)。
- ④ 额定工作温度 (°C)。
- ⑤ 炉温的均匀性 (°C)。
- ⑥ 最大装炉量 (kg)。
- ⑦ 极限真空度 (Pa)。
- ⑧ 工作真空度 (Pa)。
- ⑨ 压升率 (Pa/min 或 Pa/h)。
- ⑩ 空炉抽空时间 (min)。
- ⑪ 空炉升温时间 (min)。
- ⑫ 工件转移时间 (min)。
- ⑬ 气体的消耗量 ($\text{m}^3/\text{炉}$)。
- ⑭ 冷却水的消耗量 (m^3/h)。
- ⑮ 外形结构尺寸 (m)。
- ⑯ 炉体总质量 (kg)。

在上述技术参数中,最重要的有极限真空度、工作真空度和压升率,它们是整个真空炉的关键特性参数,是衡量设备技术水平的硬指标。这些指标如果达不到要求,则根本无法实现真空热处理的目的。压升率是指真空炉达到极限真空度后关闭所有的阀,单位时间内炉内压力的上升情况,它是检验真空炉气密性的指标。通常极限真空度小于 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,而工作真空度为 $1.33 \sim 13.3 \text{ Pa}$,压升率不大于 0.67 Pa/h 。

5. 真空炉的结构和元件

(1) 真空炉的结构 真空炉是由炉体、真空机组、液压系统、控制系统、冷却系统等几部分组成的。气冷真空炉要具备氮气储气罐,为防止停水或水压不足等,要备有高空水槽,防止因停水而烧坏或烧蚀密封件、电极等。

真空炉的炉体和炉门由高强度钢板焊接而成,具有双层水套结构形式。炉门由齿轮、齿条传动开启和关闭,灵活方便。

加热室是圆形结构,石墨管状加热器和冷却气体喷嘴沿加热室的周围成 360°

均匀分布,高级碳毡及柔性石墨纸作为保温材料,结构轻巧固定。

(2) 真空炉的加热元件 真空炉的加热元件有金属和非金属之分。

1) 金属加热元件。金属加热元件通常分为两种,一种为贵金属如钨、铂、钼、钽等;另一类为一般金属如镍铬耐热合金、铁铬铝合金、钼钨合金等。

2) 非金属加热元件。非金属加热元件分为石墨和化合物两种,而化合物有碳化硅、硅化钼、二氧化钼等。其中碳化硅在高温下易粘结、分解,而二氧化钼在1300℃时会软化,只有石墨具有加工性能好、耐高温、耐急冷急热、塑性好、辐射面积大、抗热冲击性能好等特点,适于制作加热元件。

目前真空炉的加热元件常选用石墨棒(或管)或加热管等,具有膨胀系数小、发热性好、易于加工的特点,可做成棒状、板状、管状和带状等。在真空状态下,它们产生的热量通过辐射传递给工件,因此该类真空炉的加热速度慢,大型零件应进行充分的预热,必要时进行分段加热,既能克服加热后的内外温差,又能减小加热时零件的变形,有利于保证零件的热处理质量。

(3) 隔热屏(炉衬) 它是加热室内主要的组成部分,其作用为使加热元件与炉壳分开,确保加热室的尺寸和有效加热区范围,通过隔热屏的隔热和保温,减少热损失,使零件在加热过程中温度分布均匀。考虑到所用材料应具有耐火性、绝缘性、抗热冲击性和耐蚀性以及良好的热透性等,一般有三种,即多层金属隔热屏、石墨毡隔热屏和夹层复合隔热屏。温度在1100℃以下的真空炉,使用不锈钢炉衬;而1100℃以上的真空炉则采用钼等高温合金、石墨毡以及陶瓷等材料。石墨毡作为一种新型的隔热材料,具有密度小、热导率小、无吸热性、耐热冲击性好和易于加工等特点。

(4) 真空炉的冷却系统 根据零件材料的淬透性确定合理的冷却方法,同正常的热处理淬火一样,真空冷却有强制风(气)冷、油冷、气转油冷、硝盐冷却和水冷等几种方法,一般对具体的真空炉而言,其冷却方式是固定的。风冷系统由鼓风机、高效换热器、导流管和喷嘴组成,采用炉内循环形式的结构,具有冷却速度快的特点。

(5) 真空系统 真空系统由机械泵、增压泵和扩散泵组成。炉体上装有真空计等测量仪表,随时观察炉体内的真空度,确保零件在真空状态下实现无氧化热处理。机械泵、增压泵组成的真空系统可获得中真空状态,机械泵、增压泵和扩散泵组成的真空系统能够满足高的真空度要求。

(6) 炉内传动机构 为将零件推进和推出真空炉,必须有专门的装置,通常有链传动、气动、液压传动等。对双室或三室真空炉来说,炉内传动机构既要能保证室与室之间零件的传送,又必须不阻碍隔热挡板(门)的密封。

(7) 电气控制系统 由磁性调压器、可控硅半控整流桥自耦调压器、微机控温仪等组成,实现了设备的自动化和机械化。设备具有自锁功能,任何错误的操作

备有罗茨泵、机械泵，与气动蝶阀、气动角阀等共同组成真空系统。

5) 充气系统的作用是避免零件在加热过程中氧化，在零件加热时充入低于一个大气压的高纯度氮气(99.999%)，在冷却时氮气压力应高于大气压。为防止某些材料在加热的过程中氧化，一般充入体积分数约为10%的纯度为99.9%的氢气。充气系统由储气罐、手动蝶阀、减压阀、气动蝶阀、电磁阀和管路等组成。

6) 水冷系统的作用为保证炉体各部分正常工作，炉门、炉壳、换热器、电极柄部、真空泵等都要进行水冷，同时为了防备因停水造成对上述部件的影响，必须备有单独的水塔或水箱。

7) 电控系统采用PC机等对真空炉的加热系统、冷却系统进行程序控制，进行温度控制的自动化仪表的可靠性要高。

总结国内外真空炉的结构形式，吸收国外先进的技术，我国目前自主开发了许多类型的真空回火炉，主要的特点为：加热和冷却均采用了强制气体内部循环的技术；在炉膛的顶部装有加热循环风扇，形成对流来加热零件；炉膛后面的冷却循环风扇使冷却气体经过换热器和导风板，在零件的表面形成强制对流冷却。

10.3 连续式保护气氛炉

10.3.1 概述

保护气氛热处理设备从20世纪90年代以来迅速发展，目前使用的保护气氛热处理炉有井式渗碳炉、密封箱式周期炉、推杆炉、网带炉、辊底式炉、转底式炉、链板炉等，其中比较成熟的、应用比较广泛的为密封箱式周期炉、推杆炉、转底式炉与网带炉四类。这些设备实现了热处理生产过程的自动化操作。

1. 连续式保护气氛炉的发展和应用

在零件的热处理过程中，加热设备是提供热源的基础，也是零件完成组织转变、获得所期望的力学性能的关键所在。加热设备不仅能保证正确贯彻和执行工艺参数，而且要具有生产率高、成本低、节省能源、无污染以及自动化和机械化程度高的特点。一般加热介质为空气、燃气、保护气体、真空等。在热处理过程中，炉内气氛中含有一定量的氧气、二氧化碳、水蒸气等具有氧化性的气体，这些气体与零件中的铁和碳等原子发生化学反应，即氧化还原反应，因此不可避免地造成钢铁零件表面出现氧化、脱碳，甚至是烧损等缺陷，严重影响零件的外观质量，且力学性能变差，例如，在交变应力的作用下，零件的疲劳强度会明显降低，并对零件的使用寿命带来不良影响。

目前国内汽车零部件热处理企业，大都采用井式炉、箱式炉、盐浴炉等对零件进行正常的热处理。盐浴炉除应正常脱氧外，其盐浴的腐蚀性很大，如清洗不干

净，盐渣等粘附在零件表面上，尤其是产品的沟槽、底窝内，会造成严重的腐蚀，表现形式为麻坑、曲面、剥落等，同时也产生有毒有害物质。因此，加热时应在零件表面粉刷涂料、包套或采取封箱、控制加热炉内的还原性气氛等措施，从而有效避免这种现象的发生。一般热处理过程中防止或减少零件表面氧化脱碳的措施见表 10-3。

表 10-3 一般热处理过程中防止或减少零件表面氧化脱碳的措施

加热介质	防止或减少表面氧化脱碳的措施
空气	① 工件埋进硅砂和铸铁屑的混合物质中，同时加入木炭粉 ② 零件表面涂防氧化脱碳涂料 ③ 采用不锈钢包套密封加热 ④ 采用密封罐抽真空或抽真空后通保护气氛的方法 ⑤ 采取感应加热、火焰加热、激光加热等快速加热方法 ⑥ 已脱碳层可在吸热式气氛中复碳
火焰炉燃烧产物	① 调节燃烧比，使炉内气氛呈还原性 ② 利用燃烧产物净化后通入罐内作保护气
盐浴	① 按要求严格脱氧，控制杂质的含量 ② 在中性盐中添加木炭粉、碳化钙、碳化硅等含碳活性组分 ③ 采用长效盐
保护气体	① 通入高纯度（≥98%）的氮气等可防止氧化 ② 制备气氛可控碳势，使碳势接近或等于钢的含碳量
真空	① 要求一定的压升率 ② 回充气体或冷却气体要达到保护气体的净化程度

采用连续式保护气氛炉时，通过控制炉气中 CO_2/CO 、 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 以及 CH_4/H_2 的相对含量，即可控制反应方向。所谓可控气氛是指将炉内气体混合物控制在预定范围内，其目的是有效地进行渗碳、氮碳共渗等化学热处理，以及防止钢件在加热时氧化和脱碳，采取相应的保护措施，确保表面状态和成分无变化，我国把保护气氛和渗碳气氛统称为可控气氛。

为确保零件不脱碳和保持钢表面含碳量不变，在实际生产过程中，将 CO_2/CO 、 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 的比值控制在一个比较小的范围内，使钢的反应处于平衡状态，既不脱碳也不增碳。实现炉内气氛控制，满足零件尺寸精度的可再现性、质量稳定性和表面无氧化脱碳的处理要求，降低氧化性 CO_2 、 H_2O 的含量，避免上述缺陷的产生，实现对零件热处理过程的保护。

国外自 20 世纪 30 年代开始以天然气、液化石油气等制备放热式气氛和吸热式气氛，技术逐渐成熟。匈牙利主要气门生产厂采用的技术成为 20 世纪 50 年代西方

国家保护气氛热处理技术的主要发展方向,避免了气门表面在加热过程中的氧化脱碳现象,同时具有气门变形小、质量稳定、生产率高、节约能源、劳动强度低等特点。20世纪70年代碳分子筛吸附分离空气制备氨基气氛技术的开发,使保护气氛热处理技术获得了飞速发展。我国的保护气氛热处理技术在20世纪70年代后期才发展了吸热式气氛,80年代后期,滴注式气氛和氨基气氛的出现填补了我国可控气氛的空白,为保护气氛的应用提供了技术和经济上的保障。

保护气氛炉具有良好的密封性,炉内的气氛可以十分方便地调节和控制,因此可进行多种零件的热处理,如日常的标准件、轴承、弹簧、刀具和量具、发动机用气门、连杆及曲轴、弹簧钢板、各种模具等,实现了零件的无氧化脱碳处理,表面光亮,保持了原始状态,在使用中具有良好的力学性能。

保护气氛炉的工作特点为:

- 1) 工艺的灵活性好,调节方便,节省电力,适合各种大批量和小批量的作业。
- 2) 炉内温度和气氛的控制手段先进,温差小,气氛调节迅速,可进行自动报警和自锁。
- 3) 设备的自动化程度高,整个热处理过程实现自动上料、加热、冷却等,生产率高。
- 4) 炉内组分均匀,产品质量稳定。
- 5) 炉子的密封性好,阻止外界空气进入,实现了零件的光亮热处理。

保护气氛炉与清洗机、脱脂机、回火炉、装卸料车等组成一条生产流水线,完全可满足零件批量生产的需要,为零件热处理的机械化和自动化奠定了基础。

2. 常见保护气氛的类型

根据保护气氛的特点,按原材料制取方法的不同,保护气氛通常可分为四类。

(1) 吸热式气氛 将原料气(液化石油气或天然气)与空气按C、O原子比为1:1混合,加入催化剂后在外部供热的条件下,在罐内进行反应即可制成吸热式气氛。其成分与原料气的种类有关,一般各成分的体积分数为CO 20%~24%, H_2 30%~40%, N_2 38%~45%,少量的 CO_2 、 H_2O 和 CH_4 等。吸热式气氛主要用于气体渗碳、碳氮共渗、气体氮碳共渗等,同时也可进行钢的保护加热,该气氛的应用十分广泛,具有制取成本低、组分稳定、易于实现碳势的自动控制、零件的外观光亮等特点。

(2) 放热式气氛 原料气与空气进行不充分燃烧,其产物经空冷除水后制成放热式气氛,根据气氛中还原性组分CO、 H_2 含量的多少,分为浓型和淡型两种。

(3) 净化放热式气氛 指放热式气氛经过沸石分子筛净化后,除去 CO_2 和 H_2O 而获得的气氛,它广泛用于各类零件的保护加热。

(4) 氨分解气氛和氨燃烧气氛 将氨通入有催化剂的反应罐内,氨在一定的

温度下分解,即可获得氨分解气氛(氮气、氢气和氨的混合气);使氨与空气混合后燃烧,经冷却器干燥去水,便可制得氨燃烧气氛。氨分解气氛和氨燃烧气氛主要是氮气、氢气等保护性气体,不含有 CO 和 CO₂,因此加热过程中不会出现渗碳倾向。

气氛中的氮气和氢气适用于高铬钢、高铬耐热合金、不锈钢、镍铬合金、硅钢片等零件的光亮热处理,也可用于黄铜及铜合金的退火、低碳钢的退火、高合金钢的淬火加热、金属钎焊、钢件的高温回火等,这两种气氛应用最广。四种主要保护气氛的应用范围见表 10-4。

表 10-4 四种主要保护气氛的应用范围

气氛的类型和标识	基本原料	应用范围
放热式气氛数(DX)	丙烷、丁烷、油、天然气	铁基金属光亮退火(浓型)、非铁金属退火(淡型)电机和变压器硅钢片退火、硬质合金的钎焊烧结
吸热式气氛(RX)	丙烷、丁烷、天然气	渗碳、退火、淬火、普通烧结、无脱碳的硬质合金烧结
净化氮基气氛单组分气体(NX)	丙烷、丁烷、天然气、油	铸铁退火、光亮退火、低温退火、炉膛净化处理
氮基气体(AX)	氨(利用氨的分解,产生 N ₂ 、H ₂)	合金钢的退火和硬钎焊

3. 滴注式气氛的选择和炉内碳势的控制

根据汽车零件的技术要求,结合各种滴注式气氛的特性,下面推荐几种供参考:甲醇+煤油,甲醇+醋酸乙酯,甲醇+丙酮,煤油+空气,甲醇+异丙醇,甲醇+甲苯等。应当注意到甲醇是起稀释作用的,同时渗碳剂的裂解应充分和完全,这是选择气氛的基本原则。

在保护或可控气氛炉内可进行零件的各种热处理,要保持零件表面获得理想的状态,一个重要的炉内技术指标为碳势,它是表示含碳气氛在一定的温度下,改变零件表面含碳量能力的参数,也表示碳从一相溶入另一相的能力。

在保护或可控气氛炉内加热零件时,要对表面的含碳量加以控制,其实质是控制炉内气氛的组分,目前多采用氧探头控制,也实现了计算机的多参数碳量控制,而用电阻探头控制碳势是唯一直接控制碳势的方法。

4. 保护气氛炉的特性和防爆措施

保护气氛炉具有的基本特性为:炉子的密封性好;设备的机械化和自动化程度高,具有保护装置和自动报警装置;炉内气氛均匀,温度的波动小;有安全防护装置。

为了避免保护气氛炉发生爆炸,对于 800℃ 以上工作的保护气氛炉,在升温过

程中可采取两种措施：①在设备升温前将氮气或保护气氛通入炉膛内，驱赶炉内的空气，在确认炉内空气基本干净后，可升温通气，在 800℃ 前炉子必须处于正压状态；②采用压缩空气吹扫炉膛，驱走可能存在的可控气氛后，升温到 800℃ 通入保护气氛，通常认为保护气体体积为炉膛体积的 5 倍大小时，炉内和烟道等内的空气被置换完毕。对于在 800℃ 以下工作的炉子，采用中性气体（氮气等）、可控气氛等吹扫炉膛或置换炉内空气，直到炉内气氛符合要求，然后升温通入保护气氛进行零件的热处理。

从上面的措施来看，炉内不允许存在空气是炉子升温的前提条件。当空气增加与保护气氛降到着火范围内，若有火星存在就有爆炸的可能。为防止 800℃ 以下炉子吸入空气积累，一是炉子的密封性好，二是炉内处于正压状态，三是要求采用中性气氛（如氮气等）。

5. 保护气氛炉的发展方向 and 趋势

1) 进一步将工艺、设备和先进技术相结合组成智能化计算机在线控制的保护气氛热处理生产线，炉内气氛控制可靠，工艺的重复性好。

2) 研制开发性能优异的传感器用于保护气氛生产的技术参数测试、监控和故障调节控制等，炉型趋向多用炉，安全操作设施不断完善。

3) 低压真空渗碳技术的应用范围进一步扩大，真空与保护气氛相结合，减少气体的消耗量。

4) 气体淬火技术的应用范围进一步扩大。

5) 提高处理温度、缩短工艺时间的高温渗碳技术进一步发展。

6) 开发更安全环保的密封气氛热处理炉淬火系统等。

6. 连续式保护气氛炉的类型

连续式保护气氛炉作业的特点是：生产率高，适合大批量作业；设备的机械化和自动化程度高；炉内分为加热、保温和冷却区域，可分别控制各区的功率，炉温的均匀性好等。根据零件在炉内的运动形式的差异，保护气氛炉主要分为以下几种：

(1) 网带式保护气氛连续作业炉 将工件放在传送带上（或网带上）逐渐向前移动，完成零件的热处理。该类设备适合于中小零件的淬火、正火、退火、回火、碳氮共渗等热处理工艺，是目前国内外汽车零部件行业推广使用的热处理炉。

(2) 振底式保护气氛连续作业炉 将零件直接放在炉底上，靠炉底的往复振动使零件向前运动。该类设备适合螺栓、垫片、轴承等中小零件的热处理。

(3) 推杆式保护气氛连续作业炉 将工件放在料盘上，料盘在炉底板导轨上向前移动（或脉动）。该类设备广泛应用于汽车、拖拉机轴承等机械零件的热处理，可用于气体渗氮、碳氮共渗、退火等热处理工艺。

10.3.2 网带式保护气氛连续作业炉

网带式保护气氛连续作业炉是热处理过程中应用比较广泛的一类,其具有生产率高、炉内气氛稳定、零件的表面光亮、设备的自动化和机械化程度高等优点,因此多用于大批量的生产作业,处理的小型零件有标准件、弹簧、链条、轴承、气门、量规等。炉内气氛采用滴注式系统或专门的保护气氛发生装置供给,确保气氛的均匀和前后的一致,实现零件的无氧化和脱碳处理,处理后的工件表面光亮、无脱碳层、硬度均匀,提高了零件的力学性能。

网带炉的特点为:零件加热均匀,在炉膛内不受冲击和振动;零件的变形量小,产品质量稳定;完全实现光亮淬火、正火、退火、回火以及化学热处理等。

采用网带式保护气氛炉可进行零件的化学热处理、调质处理、一般的淬火+低温回火等,是由其自身的特点决定的:由于采用辐射管加热以及网带寿命的大幅度提高,其在国内外标准件行业中得到了广泛的应用,炉内布料和加热均匀、零件热处理质量稳定、工作环境好等;碳势控制技术的应用,使炉内碳势控制精度达到 $\pm 0.03\%$,确保在保护气氛下完成零件的热处理,保证了零件的热处理要求;计算机技术的应用,可按照工艺设定自动完成零件的生产全过程,包括记录、保存零件生产中的各种工艺参数,具有完整的故障诊断、显示,安全警示及联锁功能;快速淬火油和水基淬火冷却介质得到广泛应用,快速淬火油保证了高强度零件(如螺栓)的热处理内在质量,水基淬火冷却介质解决了零件淬油不硬、淬火开裂以及零件变形的质量问题。

采用网带式保护气氛炉,零件热处理质量好,重现性好,自动化程度高。但因其采用耐热钢网带传送热处理零件,故不能承受大的质量,目前在标准件、轴承、内燃机气门、丝锥、圆板牙等产品领域应用比较广泛。

该类设备通常采用甲醇+氨基气氛系统进行内部保护加热,具有设备和生产成本低、生产运行稳定、维修方便、不受电气与水源的影响等特点,其最初是为英国氧气公司(BOC)开发的产品,生产的气氛与吸热式气氛相同。从甲醇裂解的反应可知,裂解产物为 H_2 (体积分数为66.7%)和CO(体积分数为33.3%),通过调节甲醇裂解产物和氮气的比例,生成类似吸热式气氛的20-40-40型可控气氛,使气氛既可作为保护气氛应用,也可作为渗碳气氛使用。

1. 网带炉的结构形式和主要特点

网带炉有两种形式:一种是有炉罐网带炉,该炉的加热元件(如辐射管等)在炉罐的外面,具有气密性好、节省气氛、能保护加热元件和炉衬不受腐蚀等特点,其缺点为成本高、使用寿命短;另一种是无炉罐网带炉,其特点为炉体结构简单、生产成本低,但炉体的密封性差,耗气量大。

网带的传动方式有两种:一种为炉底板拖板驱动网带,网带放置在拖板上,产

生往复运动的偏心轮驱动拖板，回缩时网带停止前进且不后退，二者之间就发生相对摩擦，因此网带的拉力减小，故提高了网带的使用寿命；另一种为网带由前后两个滚筒靠摩擦力拖动，网带在炉膛内由辊子支撑，该结构简单方便，松紧易于调整，目前广泛采用该种形式来拖动网带的运动。

网带炉采用的加热元件应根据网带炉的传动方式来确定，通常规律是无炉罐的使用电热辐射管，而有炉罐的则采用电阻带或电阻丝等，二者各有自己的特点。

在零件的加热过程中，起传递零件作用的网带既是传动工具，又是承载体，还要承受反复的加热与冷却，其工作环境和条件较差。因此，要实现安全运行，网带材料必须具有一定的性能，以下几点为选择的依据：载荷的大小，加热温度的高低，炉内气氛的组成，产生的污染气体的成分，网带传动的方式等。图 10-5 所示为无炉罐网带式淬火炉示意图。

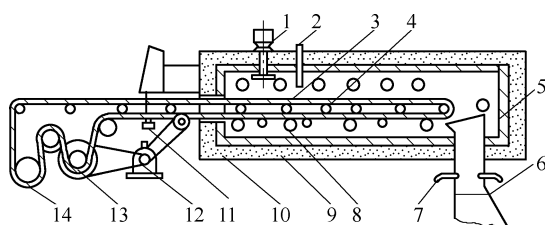


图 10-5 无炉罐网带式淬火炉示意图

- 1—风扇 2—进气口 3—网带 4—托辊 5—抗渗层
6—淬火口 7—油帘装置 8—辐射管 9—保温层
10—炉壳 11—气帘装置 12—驱动电动机 13—传动轮 14—张紧鼓

2. 炉体的组成

这里以 UM8060 型网带式保护气氛炉为例介绍其各部分的结构和特点。完成任何零件的热处理，除了具有热处理加热设备外，还必须有配套的辅助设备。网带式保护气氛连续作业炉与上料机构、前清洗机、淬火油槽（或水槽、盐浴等）、后清洗机等组成一条自动化热处理生产线。目前网带炉的形式较多，其典型形式如图 10-6 所示。该网带式保护气氛炉生产线由自动上料机、前清洗机、加热炉、油槽、中间清洗机和回火炉等构成了完整的热处理生产线，其自动化和机械化程度高，处理的产品表面无脱碳、无氧化，质量稳定，生产率高，节能降耗明显，因此在热处理企业应用十分广泛。

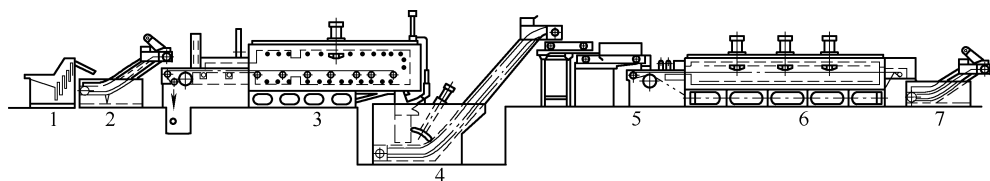


图 10-6 网带炉生产线示意图

- 1—上料机 2—清洗机 3—网带式淬火（渗碳）炉 4—淬火槽 5—中间清洗机
6—网带式回火炉 7—发蓝槽

(1) 自动上料机构 由提升装置、滚筒限高装置和振动给料装置三部分组成。零件提升到达清洗机的上方储料盘, 依靠振动将零件均匀传送到清洗机内, 根据需求的供应量, 可用挡板控制零件清洗的数量, 或用料钩将零件扒到送料网带上, 整齐排列由送料轨道将零件输入清洗槽内。

(2) 清洗机 由清洗槽、空气电加热器、油水分离器等组成, 可完成零件的浸泡、喷淋、吹风机吹干、温水清洗、烘干等。由油水分离器把油、水分开回收, 使零件在进入加热炉前已经清洗干净, 确保将零件表面的油污、尘土等除净。避免油、脏物等造成炉内气氛的波动和变化, 同时也保持了炉膛的清洁, 延长了网带炉的使用寿命。安装的管状加热器保持水温在 $40 \sim 80^{\circ}\text{C}$, 烘干加热器温度在 120°C , 完全可保证零件表面无水珠存在。

(3) 保护气氛加热炉 根据零件的具体技术要求, 炉膛可采用有炉罐或无炉罐加热。后者为目前网带式保护气氛加热炉常采用的结构形式。它具有良好的气密性, 炉壳用 5mm 厚的钢板密封焊接而成, 内部砌抗渗碳砖, 在预热室的入口设有火帘密封装置, 在保温区配有搅拌用的循环风扇, 确保炉内温度的均匀, 气氛的入口在风扇处, 废气自动点燃后从前后两处排出, 炉膛内装有 36 根各 7kW 的电热辐射管, 组成了加热系统。电热辐射管分别横于网带的上部、下部及零件出口的前侧、左右侧等部位, 确保炉内各处的温度均匀一致, 同时所有的孔洞如热电偶孔、风扇轴孔、加热元件引入孔等全部密封, 确保了网带炉内成分的稳定。

电热辐射管以电磁波的形式向外辐射热量, 它是将电阻丝或电阻带密封在耐热钢管或陶瓷管内的一种电热元件。电阻丝或电阻带发出的热量经管体表面辐射至炉膛空间, 由于电阻丝或电阻带被密封, 隔绝了炉气对其的化学作用, 因此有效延长了电阻丝或电阻带的使用寿命。国内外的热处理设备大多采用电热辐射管或燃气辐射管。电热辐射管具有不用变压器、易于安装、不必停炉等优点, 是其他热处理设备无法比拟的。

网带式保护气氛加热炉由网带驱动装置、炉内气氛搅拌器、前室、排烟装置等组成。通常该加热炉有五个加热区, 其中有一个预热区(前区)可确保炉内气氛符合要求。各区单独控温, 辐射加热管采用插入式接头结构, 更换方便。该网带加热炉的功率为 240kW, 网带全长为 8m, 网带宽度为 600mm, 最高工作温度为 1100°C 。网带驱动装置通过链条驱动滚轮, 网带靠压紧轮和驱动滚轮之间的摩擦而运动。该装置为无级调速结构, 运行速度为 $0.034 \sim 0.34\text{m}/\text{min}$, 零件在炉内的时间为 $10 \sim 180\text{min}$, 炉内碳势采用氧探头控制。

零件的加热时间应根据其直径或有效厚度的大小、材质、装炉量、摆放方式、变形量等几方面加以考虑, 零件在完成加热后可进行硬度和晶粒度的检查, 以确定最佳的加热时间。

(4) 淬火油槽 油槽为长方体结构, 内部配有搅拌器、油帘、油循环系

统、温度控制系统、冷却系统以及网带提升装置等。网带提升装置是将零件从油槽中提升的传送装置，能够确保零件在淬火过程中的硬度和变形符合技术要求。

(5) 网带式清洗机 其基本结构同热处理前零件的清洗机一样，用于去除零件淬火后粘附和吸附的淬火油，为后面的回火做好前期的准备。这样不仅保证了零件淬火后表面状态的清洁，而且为回火炉膛免遭污染创造了条件，从而实现零件的光亮回火。

(6) 网带回火炉 该炉网带运动为无级调速，网带由滚筒带动前进。炉内温度采取四区分别控制，同时炉膛上方设有四个搅拌风扇，以确保炉内温度的一致和均匀。加热元件为辐射加热管，布置在炉体的两侧，共有 24 根，总功率为 96kW。该炉的最高加热温度为 700℃，可用于零件的回火处理，也可进行普通的去应力退火、时效处理等。

(7) 冷却系统 回火后零件的冷却方式可根据技术要求而定，通常采用的冷却方式有水冷、油冷、空冷和冷却风机强制吹风（或喷雾冷却）等，对于具有第二类回火脆性的材料，在 450 ~ 750℃ 之间回火后必须水冷或油冷才能防止回火脆性的发生。汽车发动机上的进、排气门使用了低碳合金钢（如 40Cr、45Mn2 等）和马氏体耐热钢（如 42Cr9Si2、40Cr10Si2Mo、42Cr9Si2、90Cr18MoV 等），经回火后均进行水冷，目的是避免回火脆性的产生。

零件从加热到回火的过程中，始终随网带移动。由于网带运动平稳，零件彼此之间无撞击和积压等，因此在加热过程中不会出现压弯、变形的情况，极大地减轻了零件校直的工作量。同时，处理后的零件表面状态良好，各种力学性能都有很大的提高，相应地减少了加工余量。

3. 网带炉的操作和运行

(1) 加热炉 炉子自室温加热时，为了延长炉内结构的使用寿命，要分三个阶段进行缓慢加热，以防止温差太大造成网带的变形，而无法正常工作。

(2) 网带的调速 要依据零件的材料、有效直径、装炉量、炉温、零件的摆放方式等进行综合工艺试验后，确定合理的运动速度。原则为既要经济，又要提高生产率。

(3) 传动系统的调整 按工艺要求的时间进行频率的调节。

4. 淬火冷却系统

根据热处理冷却介质和零件的淬火特点，冷却系统具有自动控温功能，配有超温报警装置，对油面的高度、油的循环等实现了自动化控制，温升和提升机的运行速度控制在工艺要求的范围内，可确保冷却系统完全满足零件的技术要求。

用辅助泵给冷却槽添加油时，油面离槽口的距离在 100mm 为宜。冷却槽在起

动前要检查循环泵进出口的阀门是否打开,泵的转向和提升机的传动系统正常与否。严禁在零件的冷却过程中加入冷却介质,还应随时检查油温的变化情况和散热器的工作状况。

5. 保护气氛的供给

当炉内温度达到750℃以上时,才能滴入甲醇(或乙醇)或其他有机液体。通过汽化装置对液体状态的介质进行加热,汽化后供给保护气氛炉,该炉也可通入高纯氮气、氨气或二者的混合气体等,实现零件的无氧化加热。通常使炉膛内的保护气氛从炉膛的后部流向炉门口,点燃后形成火帘,这样可防止外界空气的进入,确保炉内成分的稳定。

为确保炉内气氛的正常供给,其汽化系统的组成为滴注剂、电磁阀、液体流量计、汽化装置等。下面以甲醇为例加以说明。

1) 检查储液罐是否正常,各种相关的阀门、管道、流量计、压力表等是否符合要求。

2) 打开空气压缩机气路阀门,使储液罐内的压力达到0.15~0.2MPa。打开保护气氛供给系统阀门,甲醇在压力的作用下滴入炉内。

3) 打开流量计并调整流量的大小,使甲醇分解后的气氛自炉膛的后部向炉门口流动,在炉门形成火帘以阻止外界空气的进入和防止可控气氛的逸出。

汽车发动机进、排气门,采用合金结构钢、马氏体型耐热钢、奥氏体型耐热钢以及高温合金等制造。经过热处理后的气门表面应无氧化、脱碳现象,硬度在30~40HRC,校直后的气门杆部直线度误差和轴向圆跳动应不大于0.15mm。既可采用高效率的机械校直或热校直,也可进行手工校直,为后续的机械加工提供合格的几何尺寸。

6. 设备点检的内容

为确保网带炉的正常工作,在日常操作中要进行如下检查:电气装置齐全、灵活、可靠;网带运行平稳,无破损;各处轴承运转良好,无噪声;各金属套冷却状态良好,无渗漏;各处电流表、电压表、热电偶、温度计、流量计等工作正常;引火嘴管道无堵塞,火焰正常;冷却油槽油温和液面正常。

10.3.3 振底式保护气氛连续作业炉

1. 振底式保护气氛连续作业炉生产线的组成及特点

该类热处理设备由上料机、加热炉、淬火槽等结构组成,其主体为炉体、振底板和振动装置,它依靠惯性力作用脉动向前移动来实现对零件的推进,具有机械化程度高、质量稳定性好、生产成本低等特点,是比较合理和实用的热处理设备。为防止零件在加热过程中出现氧化和脱碳,影响零件的使用寿命,振底炉连续生产线(图10-7)要采用保护气氛加以保护。

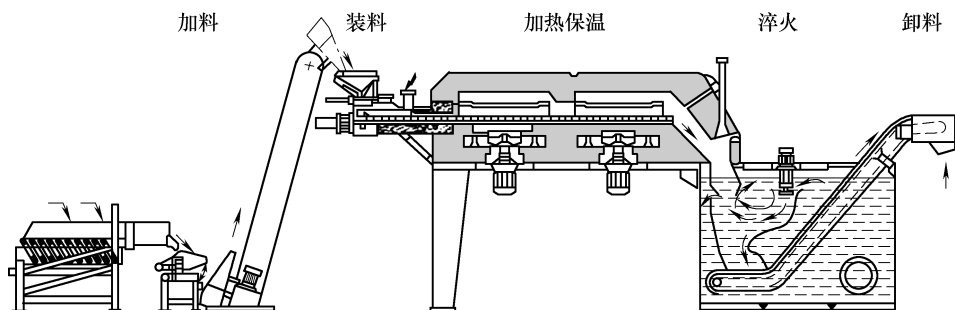


图 10-7 振底炉生产线主要结构简图

振底炉为依靠振底板的往复运动使零件前移而完成加热工艺的一种热处理设备，可实现零件热处理的连续化作业。该炉具有结构简单、自动化程度高、节能效果好、操作和维修方便、零件的产品质量稳定等特点，因此应用较广。

2. 振底炉的类型、工作原理和结构特点

振底炉的振动结构可分为电磁式、机械式和气动式三种。

(1) 电磁式振底炉 电磁式振底炉如图 10-8 所示。由硅整流器半波得到断续

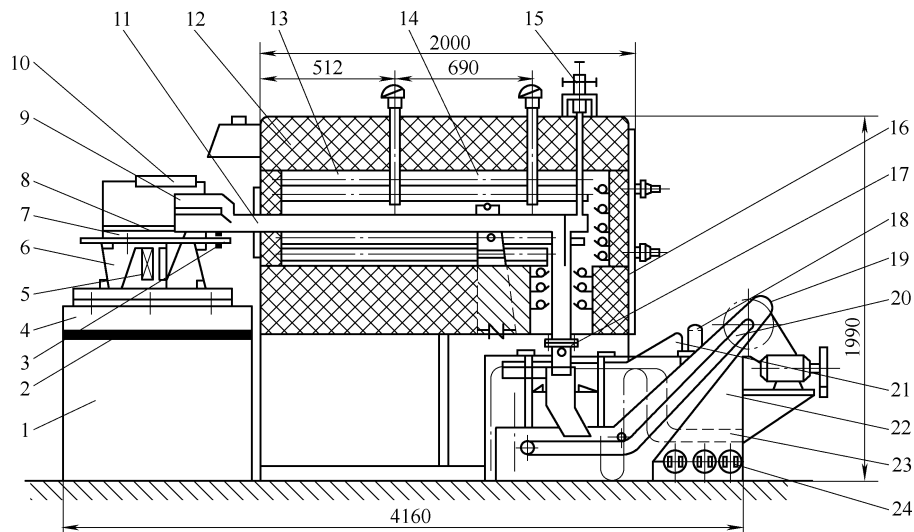


图 10-8 电磁式振底炉

- 1—支架 2—减振橡胶 3—压紧螺栓 4—工作台（配重） 5—电磁铁 6—弹簧板 7—连接片
8—张紧弹簧 9—加料盒 10—加料斗 11—振动炉罐 12—炉盖 13—电阻丝 14—支承
15—滴量器 16—炉体 17—保护气进口 18—液压泵 19—输送带支承板 20—输送带出料机构
21—油管 22—油箱 23—蛇形管 24—电加热器

的脉冲直流电,使电磁铁交替进行吸引和释放,在振动簧片的弹力作用下产生往复运动。零件放在上料斗的底部,由于振动零件沿螺旋斜坡上升进入振底炉。用电磁振动上料机构,出料采用振动或网带输送,可实现零件的全部自动化作业。电磁式振底炉利用共振驱动零件向前移动,其结构简单,驱动力比较小,采用时间继电器来调节加热时间,用于小型零件的热处理。

(2) 机械式振底炉 该类热处理设备分为两类,即凸轮连杆式和平面凸轮振动式。前一种利用凸轮的旋转将蜗轮杆顶高,主轴旋转将振底板向后拉出,该类运动可靠,结构比较复杂,采用无级变压器调节加热时间,多用于中、小型零件的淬火、退火、回火等热处理工艺。平面凸轮振动式利用无级变速器带动平面凸轮旋转,使振底板突然停止,工件则利用惯性向前移动,由于炉子的振动周期靠无级变速器调整,因此可以满足不同零件的热处理要求。

(3) 气动式振底炉 气动式振底炉如图 10-9 所示。调节时间继电器或旋转分度触头,利用气缸带动振底板加速向前运动,然后靠气垫的反压使振底板突然停止,工件在惯性的作用下向前运动一段距离,气缸则缓慢运动使振底板复位。

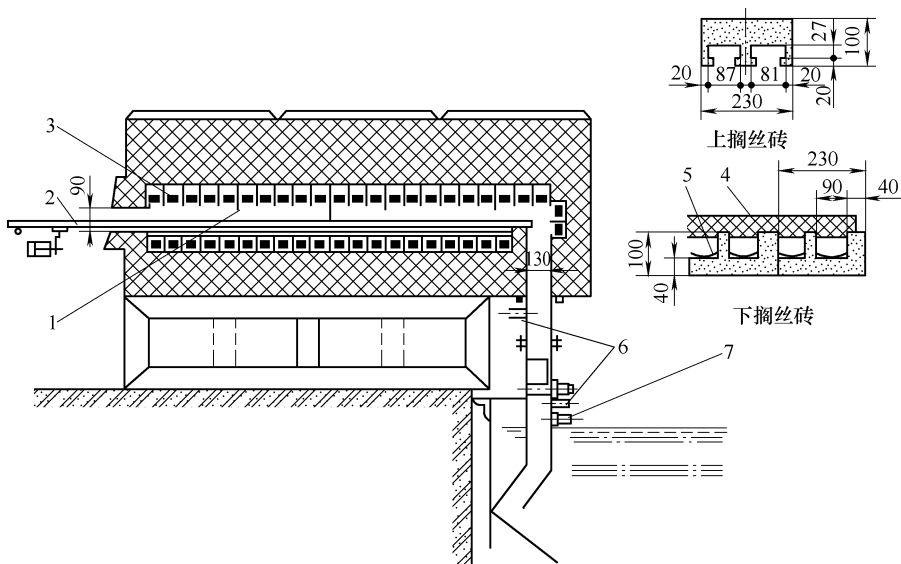


图 10-9 气动式振底炉

1—热电偶孔 2—炉底板 3—电热元件 4—碳化硅砖 5—炉底搁砖
6—保护气进口 7—水油膜喷嘴

气动式振底炉具有结构简单、动作灵敏的特点,但其受气压波动的影响较大,气缸活塞容易损耗,同时工作时振动大。采用时间继电器来调节工件的加热时间,可用于各种零件的热处理。

一般零件运动的快慢同气缸的运动速度及炉底板的振动频率大小有关,调节气缸运动频率的大小,则可得到不同的零件移动速度。

3. 振底炉的主要组成部分

一般振底炉的工作过程为:依靠驱动机构使炉底板加速前进,当速度达到一定值时突然停止运动,使炉底板上的零件借助于惯性,克服与炉底板的摩擦力向前滑移,随即炉底板返回。通过炉底板周期性的往复运动使零件在炉底板上脉动向前移动,最后移出炉外,完成零件的热处理过程。

与网带炉和推杆炉相比,振底炉的炉底板始终处于高温状态,不经受冷热交替,因此炉底板的使用寿命长,同时克服了推杆炉料盘堆积拱料现象,适合于各种尺寸工件的加热,进出炉十分方便。

炉底板的材料有两种:金属板炉底板和耐火混凝土炉底板。温度低于 700℃ 时,使用普通碳素钢板焊接成槽形炉底板;温度在 700 ~ 900℃ 时,炉底板用 15 ~ 20mm 的耐热钢板(06Cr18Ni11Ti、20Cr15Mn15Ni2N、16Cr25Ni20Si2 等)或铬锰氧钢(26Cr18Mn12Si2N)浇注而成。而耐火混凝土炉底板由于脆性大,在工作过程中受振动易断裂,故一般不再使用。

下面介绍振底炉的主要结构组成。

(1) 装料机构 零件倾倒在振动料斗和滑槽内,经称重器控制将零件倒入提升料斗内,料斗内的零件经传动机构提升到振底炉装料口,零件自动滑入清洗机内,经过清洗、喷淋等后,被输送到炉底板上,炉底板以一定的振幅振动,零件在振动过程中进入加热室炉膛内。装料机构通常有三种,即扇形齿轮推料斗、抽板式送料斗和电磁牵引加料斗,三者的结构不同,具体选用应根据零件的尺寸、形状和技术要求等来确定。

(2) 加热炉 加热炉是整个生产线的核心,它由加热和保温两段炉膛区域组成。加热元件为气体加热辐射管或电加热辐射管,其均匀布置在炉膛内。炉底板由陶瓷砖支撑,为了确保加热区和保温区的炉温均匀一致,炉底装有炉内气体循环搅拌风扇,各区域配有单独的温度控制系统,可实现自动控制。

(3) 冷却系统 炉内零件保温结束后,自炉膛滑入淬火槽内冷却。根据零件的材质、金相组织和硬度的不同,可选用盐水、油、硝酸盐浴等作为淬火冷却介质。淬火槽内配有冷却搅拌装置。冷却后零件由钢制传送带送进后清洗槽中清洗和喷淋,进入回火炉完成热处理的组织转变。

10.3.4 推杆式保护气氛连续作业炉

1. 推杆炉的应用和工作特点

在推杆式保护气氛炉中零件依靠液压或压缩空气驱动顶杆,一盘一盘进入炉中

和自炉内顶出,为大批量生产用热处理设备,多用于中小零件的退火、正火、淬火、回火和渗碳、碳氮共渗等,在机械行业零件的热处理中占有一席之地。推杆炉以电能为热源,电流通过电热元件发热,通过辐射和对流的方式传给工件,将零件加热到要求的工艺温度。

该类炉是一种适应单品种大批量生产的热处理设备,其具有生产量大、质量稳定、质量重现性好、自动化程度高以及节约能量等优点,为目前单品种大批量热处理零件生产的首选设备。由推杆炉、回火炉、清洗机、预处理炉和淬火油槽等组成的全自动处理的热处理推杆炉自动生产线,可进行零件的清洗、预氧化处理、排气、加热、渗碳、扩散、淬火、回火等一系列工序过程,其对炉温、气氛、机械传动、炉子安全性等进行全面的自动控制,确保设备在安全的状态下运行。

该类炉子具有以下特点:炉膛内温度分布均匀,温差在 $\pm(3\sim 8)^{\circ}\text{C}$;满足多种热处理工艺要求,热量不易散失,故热效率高;液压或压缩空气推进料盘,易于实现机械化和自动化操作;劳动条件好,无环境污染;通入保护或可控气氛能够进行零件的保护加热和化学热处理;工作温度范围宽,自动控温。

2. 推杆炉的结构组成

推杆炉主要由下列部分组成:主推料机构、前室、前室门、防爆阀、内炉门、炉体、侧推料(或拉料)机构、后炉门、后室、淬火槽、升降台等,可进行化学热处理(如渗碳)及光亮淬火等。与清洗机、回火炉以及料盘传动机构结合构成生产线,可实现全过程的自动化控制。

(1) 炉体 炉体由炉壳、炉衬、炉膛、风扇和炉门等部件组成。

炉膛一般由预热室、加热室和预处理室等组成,每室中间交接处炉膛减小,使各区温度和气氛的相互干扰减少,从而减少对各区保温温度和含碳量的影响。导轨由耐热钢或碳化硅制成,料盘放置在导轨上进行零件的加热。零件从后室移出炉门进行退火或淬火,淬火油槽(或水槽)在炉门的下方。

(2) 其他辅助装置 淬火机构由淬火升降台、淬火槽、搅拌器和循环系统等组成,该机构应确保淬火冷却介质的温度控制在工艺要求的范围内。淬火冷却介质应根据零件的热处理技术要求正确选择,淬火冷却介质若为液体,则要配备油泵或水泵,以满足不同的工艺要求。炉膛内几个加热室的上方分别配有风机,能保证炉膛内温度的一致。推杆炉结构如图10-10和图10-11所示。

(3) T-85、T-140 推杆炉的结构组成 T-85、T-140两种推杆炉的生产率为 850kg/h ,为半自动化作业,专供中小尺寸零件进行淬火、正火、退火、回火和化学热处理等,其最高工作温度分别为 650°C 和 950°C 。T-85热处理炉前室、中室和后室的功率分布为 43kW 、 20kW 、 22kW ;T-140热处理炉前室、中室和后室的

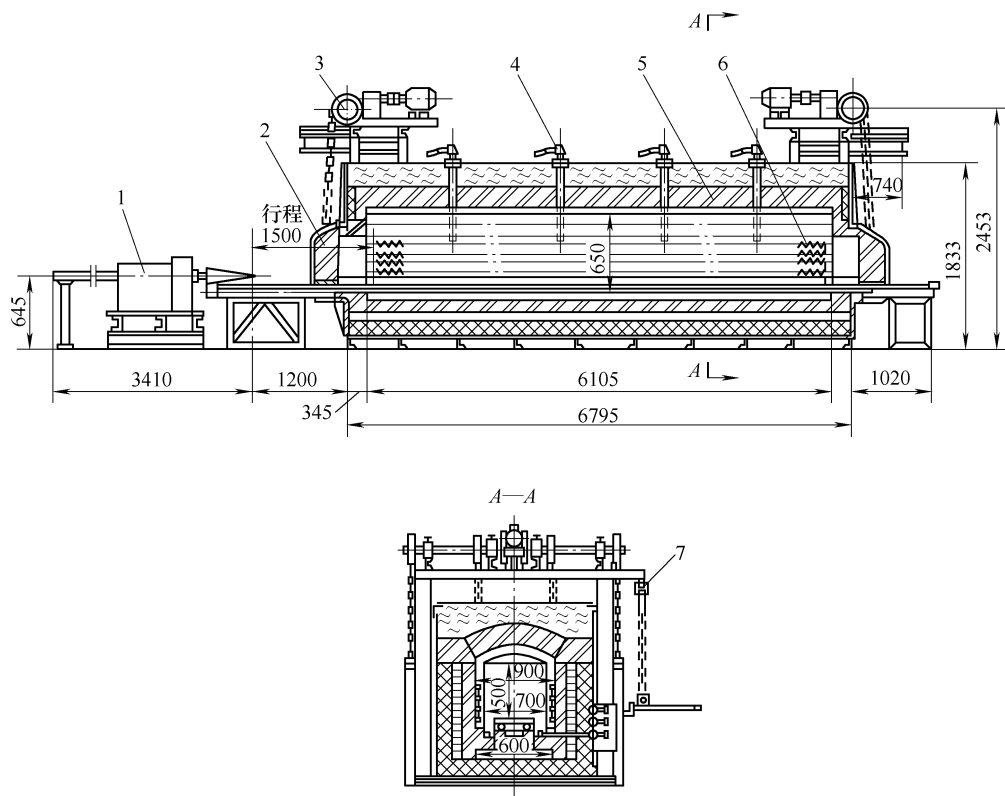


图 10-10 推杆式热处理炉

1—推料机构 2—炉门 3—炉门升降机构 4—热电偶 5—炉衬 6—电热元件 7—悬挂叉

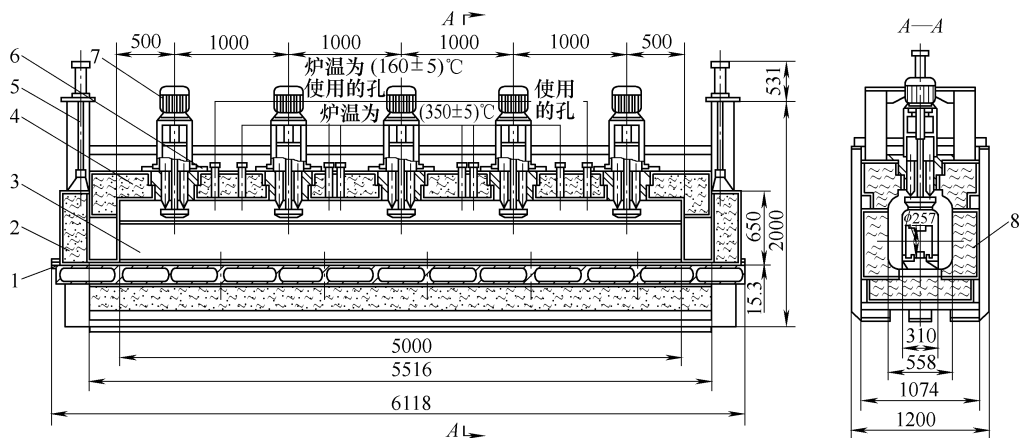


图 10-11 推杆式回火炉

1—炉架 2—炉门 3—炉膛 4—炉体 5—炉门升降机构 6—热电偶孔 7—循环风扇 8—纤维炉衬

功率分布为 73kW、31kW、36kW。从炉膛内功率的分布来看,前室的功率最大,原因在于冷的零件进入炉膛内需要吸收大量的热量。当零件被推进中室和后室时,零件已经到温并保温(透烧),因此功率减小了。

1) 推料机构。推料机构间歇地把放在轨道上的料盘推入炉内或炉外,零件在炉膛内运行时与料盘相对静止,出炉淬火时料盘自动反转倾斜将零件倒出。推料机构由液压缸和推杆组成,其将装载零件的耐热钢(材料一般为 06Cr25Ni20)料盘推进加热炉内进行加热,其行程由两限位开关控制,送料一次液压缸自动往返运动一次,炉膛内外有轨道相通,二者的水平位置一致,料盘被推进炉膛后开始加热。零件与料盘一起向前运动过程中完成零件的加热过程,通常淬火处理的方式有料盘与零件同时淬火、二者分离淬火两种。前者仅用于尺寸较大或对变形要求严格的零件,通常不采用该方法;后者是将零件散落在淬火冷却介质中进行冷却处理,具有冷却均匀、料盘使用寿命长、能耗低、炉内气氛稳定等特点,目前汽车零部件制造中部分零件如气门、销轴、标准件、轴承等小型零件大多数选用这种方法进行冷却。

2) 加热室。加热室为推杆炉的主体,是完成零件热处理的关键区域,它由铸钢和钢板焊接而成,两端由铸铁面板封住前后炉门。炉膛内由耐火材料砌成,内置加热元件,分别布置在炉膛的两侧,炉顶部装有搅拌风机,加强炉内气氛的对流。为防止零件加热时出现氧化或脱碳,可采用有机液体分解的方法或通入保护气体。炉内由三个区域组成,分别为预热区、加热区和保温区。料盘的送入和移出完全由液压系统完成。

3) 卸料台。卸料台是由角钢焊成的支架,上面装有一对轨道,用来承接从加热炉推出来的料盘。

4) 液压装置。采用了齿轮液压泵,产生的高压油驱动推杆和控制炉门的升降。

5) 电气控制柜。其工作程序为:提升炉门后,将卸料门端已经加热结束的料盘取出;放下炉料门,提升装料门,由推料机构将已经装满零件的料盘推入加热室,放下加热室炉门,零件在推杆炉内进行加热。

推杆式保护气氛连续作业炉具有自动化程度高、热处理质量稳定、重现性高等特点,适用于大批量、单品种零件的热处理。其控制系统采用了计算机控制,炉门的开启、关闭均按指令自动进行。其与回火炉、清洗机等连成一条完整的热处理生产线,在生产线上可进行零件的渗碳、淬火、回火以及清洗等工序。

该推杆炉的缺点是:料盘反复加热和冷却,造成热量的部分散失;对要求硬度不同的产品进行处理时,需将原有零件全部推出后方可调整温度,故其工艺适应性差。

10.4 燃气高温炉

1. 燃料炉的发展历史

一般热处理加热设备存在以下问题:

- 1) 设备的自动化程度低,基本上还是手工操作,工人劳动强度大,劳动环境差。
- 2) 电力消耗大,炉温的均匀性差,易造成晶粒的长大。
- 3) 加热的方式多为辐射或对流,生产率低,不适合大批量作业。
- 4) 加热的介质为空气或盐浴,零件表面在热处理过程中往往会受到氧化和脱碳,影响其使用寿命。

考虑到以上不足,要实现零件的机械化和自动化操作,确保加热炉内温度的均匀性,避免零件的氧化和脱碳现象的发生,提高设备的利用率和零件的使用寿命,同时也提高热处理工艺水平,需要不断开发新的热处理设备和采用新技术、新工艺。

燃气炉是对金属零件进行热处理的主要设备,在几十年的生产过程中,伴随着新能源的开发和燃烧技术的不断提高,其各项技术指标有了长足的进步,向着提高热效率、加大装炉量、产品表面光亮、内在质量得到有效控制等方面发展。目前国内许多热处理企业也致力于解决电力紧张的难题,不断探索采用燃料炉的作用。将燃料燃烧转化为电力,再用电转变为热来加热零件,这实际上是能源的巨大浪费,利用率不到50%。因此,燃料炉在许多企业得到了推广和应用,用于零件的锻造加热、退火、普通热处理以及部分化学热处理等,获得了良好的社会效益和经济效益。

2. 燃气炉的类型和结构特点

根据燃料炉使用燃料的状态不同,可分为固体燃料炉、液体燃料炉和气体燃料炉三类。其中固体燃料炉以燃煤为主,大多为块煤、煤屑、煤粉和焦炭等,半煤粉改进的燃料炉也已经出现。一般固体燃料炉的炉膛大,多用于零件的退火、固体渗碳和一般的热处理等。这里重点介绍汽车零件热处理用燃气炉的类型与特点。

气体燃料炉(简称燃气炉)以天然气、工业煤气、液化石油气等为原料进行零件的热处理。可燃气体和空气在炉内混合,燃烧充分,同时可控制其燃烧过程,来确保炉膛内温度的均匀性。气氛呈还原性,通过调节炉内气氛能抑制零件的氧化和脱碳,可满足各种零件热处理工艺的需要。

燃气炉的制造比较简单,易于实现操作的机械化和自动化,操作者的劳动强度低,是一种经济适用的燃料炉,使用的气源为各种煤气(如发生炉煤气、富氧煤气、焦炉煤气或城市煤气等)和天然气,个别的采用液化石油气。气体燃料具有

燃料来源广、成本低等特点。

(1) 燃气炉的分类 按热处理工作的性质，燃气炉分为周期式作业炉和连续式作业炉。常见燃气炉的炉型和应用范围见表 10-5。

表 10-5 常见燃气炉的炉型和应用范围

序 号	燃 气 炉	适用的热处理工艺
1	密封燃气箱式炉和台车炉	零件的正火、淬火和回火，固溶和时效，固体渗碳和碳氮共渗
2	燃气底板式热处理炉	零件的正火、淬火和回火
3	燃气推杆式热处理炉	多用于淬火、回火
4	燃气输送带式热处理炉	零件的正火、淬火和回火
5	燃气井式炉	淬火
6	燃气高锰钢淬火炉	淬火
7	燃气耐火混凝土振底式炉	淬火、正火和回火等
8	燃气金属板炉底振底式炉	淬火、回火

(2) 燃气炉的构成 炉架是用来固定炉砌体的金属结构件，具有高的结构强度，能保持炉子的密封性。砌体是承受载荷的主要结构部分，根据炉墙、炉底、炉顶的结构形式来确定耐火材料与绝缘物质，炉膛、排气烟道的设计应合理。测温孔、观察孔、排烟口、烧嘴的位置与数量以及布置等方面应符合技术要求，常用的砌炉用泥浆及填充材料、涂料等要确保合格。

(3) 燃气炉的辅助装置

1) 烧嘴（喷嘴）即燃烧装置，燃料炉的热量供给是靠气体燃烧实现的，烧嘴（喷嘴）在燃烧过程中提供一定温度的气体，在加热过程中起到促进燃气流动、强化循环的作用。燃烧装置具有下列特点：保证燃烧充分，气体成分可控；燃烧过程中连续供气，保证炉内温度一致；燃烧火焰的方向、外形等符合工艺要求；结构合理，维修方便。

烧嘴（喷嘴）有油嘴、煤粉喷嘴、煤气喷嘴等几种，根据火焰的形状烧嘴分为有焰和无焰两种，而热处理设备采用的是有焰烧嘴，其特点为煤气与空气全部或大部分在烧嘴外边混合边燃烧，形成长的火焰，其结构十分紧凑，因此这种烧嘴有利于炉内气体的流动，不会造成零件局部过热或过烧，可避免回火现象的发生。

2) 排烟口。燃烧后的炉气要正常地从炉膛内排出，排烟口的位置十分重要。通常将其布置在炉顶、炉底、燃烧的对方炉膛和同方向一侧。排烟口位置的选择应遵循使高温炉气包围零件，对流和辐射传热效果增强，炉底不会有冷气层等原则。

3) 管道与风机。它们用来输送燃气和燃气燃烧所需的空气，起到使燃气与空气均匀混合的作用。一般有煤气（或天然气）管道和空气管道等，炉用煤气管道要采用流路最短，转弯、收缩、扩大、分流节点最少的方案；空气管道向炉内供

风,可采用单台炉子供风,也可成组供风,要求其与管理管道相匹配,确保每个烧嘴前空气的压强均匀一致以及便于调节流量。停炉后和开炉前,要将积存的煤气和空气混合物排出,以防发生爆炸。

4) 炉用机械。炉用机械分炉口结构和炉门升降机构。炉口结构是由炉门和导板组成的,炉口导板有 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 倾斜角,导板与炉门上各带有楔形条,以提高炉门的密封效果。关闭炉门时,依靠炉门的自重及楔形条的锁闭作用将炉门关紧。

炉门升降机构有以下几种:单面链轮杠杆式机构,用于炉门质量在180kg以下的情况;直接传动链轮升降机构,用于大的炉门;快速运动链轮升降机构;气动炉门升降机构,用于动作快、牵引力大、结构复杂的炉门,炉门质量为150~2000kg;电动炉门升降机构,配有卷扬机。

3. 燃气炉的燃料种类

根据燃气炉燃料供应状态的不同,燃气可分为以下几种:天然气、焦炉煤气、高炉煤气、城市煤气、发生炉煤气、地下煤气、液化石油气等。

煤气为工业炉中应用最广的一种燃料,而城市煤气不仅是民用燃料也是工业燃料,一般不保证化学成分,只要求燃烧的热量满足要求。液化石油气是石油炼制厂和化工厂的产品,主要成分为碳三馏分(C_3H_8 、 C_3H_6)和碳四馏分(C_4H_{10} 、 C_4H_8),在常温下是气态,在压力作用下压缩成液体状态,易于罐装和便于运输。

目前天然气已经正式用作热处理加热气源,在汽车零件的加热过程中,发挥着重要作用。天然气具有成本低、管道输送、工艺成熟等特点,主要应用在高温加热炉中。

4. 燃气炉的运行与流程

(1) 检查内容 燃气炉在点火前应依据操作规程和具体的技术要求,依次检查下列内容,确保燃气炉的正常运行。

- 1) 各电气装置齐全、完整,运行正常。
- 2) 进出的料车运转可靠。
- 3) 运转轴承润滑良好。
- 4) 各处的水冷套状态正常。
- 5) 各电压表、电流表、温度计(包括热电偶)正常。
- 6) 可控气氛、压力等符合要求。
- 7) 氮气的压力正常。
- 8) 冷却水循环正常,温度在工艺范围内。

(2) 正常生产过程 确保氮气的纯度在98%以上,流量在 $15m^3/h$;煤气或液化石油气的压力在7kPa左右。装炉和出炉操作按以下要求执行。

- 1) 打开炉门按钮,炉门上升。
- 2) 按料车上“小缸上升”按钮,料筐上升10cm。

- 3) 按“移动料车”开关, 小车进入炉膛内。
- 4) 按“小缸下降”按钮, 料筐放在炉内支架上。
- 5) 关闭炉门, 点火后混合气体燃烧, 保温后自动打开计时器计时。

(3) 操作情况

1) 炉内压力是通过改变烟道闸门或排烟管阀门的开启来调节的, 使炉气充满整个炉膛, 保证炉内的正常压力值, 控制炉底表面处为零压, 排烟过程中烟道内应有足够的抽力。

2) 炉温调节的目的是控制零件表面达到要求的温度, 并且保温直至零件中心也近似达到相同的温度。影响炉温均匀性的因素有: 烧嘴的合理布置和操作, 燃烧时呈光亮火焰或透明火焰, 燃烧气体的出口温度、速度和方向, 零件之间的间距和垫铁高度, 排烟口尺寸和高度等几个方面。

5. 高温燃气固溶炉的结构、性能及应用

奥氏体钢气门的固溶是在高温加热炉中完成的, 盐浴炉、电阻炉、真空炉均可进行热处理, 但存在高能耗、低效率、辅助时间长、劳动强度大和环境污染等缺陷, 制约了气门固溶处理的生产。燃气炉则克服了上述不足, 以清洁高效和低成本而被气门制造企业所认可与应用, 具有广阔的应用前景。

(1) 奥氏体钢气门的性能对热处理设备的要求 奥氏体钢气门需要进行半固溶处理、完全固溶处理, 热处理温度在 $1100 \sim 1200^{\circ}\text{C}$, 保温足够时间以达到碳化物完全溶解的目的。为避免气门表面过度氧化和脱碳, 需要进行保护加热处理。奥氏体钢气门热处理的技术要求比较严格, 晶粒度多控制在 4 级以内, 故对炉温的均匀性提出了较为严格的要求, 另外考虑到气门的加工余量等, 要求固溶处理后其表面(含气门杆部直径、圆弧等部位)的氧化和脱碳少, 因此气门的固溶处理需要用炉温均匀和具有保护气氛的热处理设备来完成, 而高温燃气炉则解决了该问题。

(2) 燃气炉的结构与性能

1) 燃气炉的工作原理与操作过程。高温燃气炉是可进行奥氏体气门固溶处理的专用热处理设备。其为一种箱式高温炉, 有独立的排烟管道, 炉膛内部有四个耐热砖制作的支撑柱, 气门堆放在耐热钢制成的长形盒子内, 两个火焰烧嘴布置在炉膛的两侧, 为上下错位布置, 燃烧的火焰围绕着气门工艺装备循环加热, 确保炉温的均匀一致。热电偶安装在炉膛的顶部, 按下“点火”按钮后, 鼓风机送入的空气与燃气混合后进入炉内燃烧完成气门的加热, 即通过自动进气装置对燃气配比进行自动调节, 来确保达到工艺规定的温度。温度控制以及进出料小车全部为智能化管理, 工件的取出与送进由气缸上下控制。该炉配有快速冷却水槽, 设有温度报警仪表和计时系统, 排气口设为 $70 \sim 90\text{mm}$ 。其具有气门固溶后晶粒度均匀一致性好, 晶粒度可控制在 1~1.5 级以内, 表面状态较好, 生产率高, 热处理成本低等特点。图 10-12 所示为燃气炉的整体结构形式, 图 10-13 所示为料筐取出后准备进

行水冷的过程。



图 10-12 燃气炉的整体结构形式



图 10-13 料筐取出后准备进行水冷的过程

2) 燃气炉的保养与维护。燃气炉可采用的气源有以下几类：天然气、液化石油气、城市煤气等。如果采用煤气罐、液化气罐，则将每次剩余部分气体（因燃气炉需要供给的压力在 7MPa 以上）；而采用管道供应燃气，可明显节省燃气。下面介绍有关注意事项。

燃气炉的升降炉门内衬应采用硅酸铝纤维毡，一是起到保温的作用，二是可减轻炉门的质量，保护升降的机械装置。为确保炉门在服役过程中不变形，应在炉门框的四周安装水套，通入自来水或循环水，出口水温应不高于 60℃。炉膛内支撑料筐的四块钢砖的高度应一致，应设定在上下两个烧嘴的中央区域，目的是确保气门的均匀加热，防止火焰直接喷射在气门上，造成局部的烧蚀。进出料车的前叉与支撑砖应平行，二者之间的间隔应均匀一致，保证料筐起落时不变形，否则容易造成料筐的翻倒。一人操作时应随时观察燃气的压力与控温仪表指示情况。出气口大小调节的基本原则是形成正压。注意检测或用嗅觉识别有无漏气现象，设备周围严禁有明火或抽烟现象。每次开炉前用压缩空气清理吹扫炉内炭黑和残留气体，清理炉膛内部的氧化皮及杂物等，否则容易引起工件表面的局部不良。对于要求表面比较清洁的气门，可采用上部加盖的形式，减轻其表面氧化影响程度。通过观测孔，经常观察火焰的燃烧是否正常。

3) 高温燃气炉与盐浴炉的性能与成本对比。燃气炉作为一种可以替代盐浴炉、高温保护气氛炉等的固溶处理设备，正逐渐被气门制造厂家所接受，其原因如下：

① 燃气炉的设备操作简单，可实现自动化生产作业，具有较高的效率，降低了操作者的劳动强度。固溶处理气门的装料十分简单，直接从料箱中倒入，省去了盐浴固溶时人工插筐的繁琐劳动，同时也能避免料筐放偏与电极接触的问题，避免气门的局部加热温度高而造成晶粒粗大的缺陷；另外，无捞渣和添加盐的辅助工序

与操作,在有效的时间内可完全进行气门的固溶处理。

② 燃气炉的装炉量大,产品质量稳定(与盐浴炉相当)。目前国内大多数气门的固溶处理是在盐浴炉中完成的,采用人工放入与挑出。燃气炉的装炉量是盐浴炉的7~8倍,即一台燃气炉的效率为一台盐浴炉的7倍以上。

③ 燃气炉进行气门固溶处理的成本低,无环境污染。盐浴炉的设备功率为100kW,燃气炉采用天然气或液化石油气(或城市煤气等)进行气门的加热。燃气炉固溶处理气门的成本为盐浴炉的1/10,从气门固溶处理成本与技术上讲,燃气炉替代盐浴炉势在必行。

4) 燃气炉的点火系统。燃气炉的点火系统科学、规范,采用电子点火安全、可靠。根据设定的炉温,自动调整燃气与空气进气阀的大小,来控制温度的高低,其温度的均匀性在5~10℃以内,满足了气门固溶处理对温度均匀性的要求。

5) 燃气炉的应用前景。作为一种新型的高温加热设备,为确保炉膛内温度的均匀和保温效果,其体积比较庞大,近似于大型箱式电阻炉,各种进排气(燃气、空气、氮气等)管道以及辅助装置较多,同时配备有小型行车作业系统等,有利于更好地完成生产与自动化作业。整体上讲,该设备比高温电阻炉的气门固溶质量更加稳定,加热效率高,因此,该设备在国内外已经得到了认可与应用。

10.5 感应加热设备

除了上述几类热处理加热设备外,可进行表面淬火处理的设备包括感应加热设备、火焰加热装置、激光加热装置、电阻加热装置、电接触加热装置等,它们具有加热时间短、生产率高,以及产品表面硬度高、疲劳强度高特点。其中感应加热设备是目前汽车零件热处理应用比较广泛的设备,在表面淬火与硬化领域具有明显的特点与优势,在轴类、齿轮、蜗轮与蜗杆、内外套圈等零件的表面淬火方面是其他热处理设备无法比拟的,其缺点是无法进行大批量的作业,设备的投资大等。

1. 感应加热设备的分类

感应淬火是利用零件在交变磁场中产生的感应电流,将零件表面一定深度加热到淬火温度,随后快速冷却的淬火工艺。感应加热是通过改变电流对零件表面产生热效应、趋肤效应、邻近效应和尖角效应来实现的。

通常按感应加热的频率大小,将感应淬火分为高频感应淬火、超音频感应淬火、中频感应淬火和工频感应淬火等。感应加热设备的种类、特性与应用见表10-6。

表 10-6 感应加热设备的种类、特性与应用

感应加 热设备	频率 范围 /kHz	主要 频率 /kHz	功率 /kW	效率 /(%)	形 式	应 用 范 围
高频设备	100 ~ 500	250	5 ~ 500	50 ~ 75	电子管、晶体管	脉冲淬火、表面淬火
超音频设备	10 ~ 100	35	5 ~ 500	50 ~ 75	电子管、晶体管	表面淬火
中频设备	0.5 ~ 10	8	15 ~ 1000	70 ~ 85	发电机、晶体管	表面淬火、透热热处理
	0.18 ~ 8	2.5	15 ~ 1000	90 ~ 95		
工频设备	0.05	0.05	100 ~ 2000	70 ~ 90	—	深层淬火、透热热处理

2. 感应加热设备的技术参数

应当指出，各种感应加热设备具有性能的差异，下面分别介绍如下。

1) 高频感应加热装置是将频率为 50Hz 的交流电通过高频振荡器，变为 100 ~ 500kHz 高频电流的大功率变频器。电子管式高频感应加热装置的型号与技术参数见表 10-7，改进型电子管式高频感应加热装置的型号与技术参数见表 10-8。

表 10-7 电子管式高频感应加热装置的型号与技术参数

设备型号	振荡频率 /kHz	振荡 功率 /kW	输入 功率 /kW	阳极 电压 /kV	振荡管		整流管		冷却 水量/ (L/h)	应用
					型号	数量	型号	数量		
GP8-CR10 GP8-CR15	300 ~ 500	8	18	8.1	FU-89S	1	EG1-1.25/10	6	540	淬火、冶炼
GP30-CR11 GP30-CR16	200 ~ 300	30	55	15.0	F-431S	1	ZG1-6/15	7	1000	淬火、冶炼
GP60-CR11 GP60-CR13 GP60-CR14	200 ~ 300	60	100	15.0	F-431S	2	ZG1-6/15	7	1600	淬火、冶炼
GP100-C2 GP100-C3	200 ~ 250	100	180	15.0	F-433S	1	ZG1-6/15	7	2500	淬火、焊接
GP200	200 ~ 250	200	320	15.0	F-433S	2	ZG1-40/15	7	5000	淬火、焊接

2) 将高频感应加热装置改换一个振荡柜，即成为超音频感应加热装置。高频感应加热的频率为 200 ~ 300kHz，中频设备的频率为 1 ~ 8kHz，对于模数为 3 ~ 6mm 的齿轮、链轮、花键轴等零件进行表面淬火时，两种加热设备均会出现温度不均匀的现象。利用高频与中频之间的频率范围，采用 30 ~ 40kHz 的超音频频率加

热，可获得良好的效果。电子管式超音频感应加热装置的型号及技术参数见表 10-9。

表 10-8 改进型电子管式高频感应加热装置的型号与技术参数

设备型号	振荡频率 /kHz	输出 功率 /kW	振荡 功率 /kW	输入 功率 /kW	冷却 水量 /(L/h)	应 用	设 备 组 成
GP10-C2	500~1000	8	10	15	800	淬火、焊接	振荡柜
GP30A-C2	200~300	25	30	50	1500	淬火、焊接	振荡柜、整流柜、变压器
GP60-CR13-2	200~300	50	60	100	3000	淬火、熔炼	振荡柜、整流柜、调压器
GP100-CM	200~300	85	100	180	3200	淬火、焊接	振荡柜、整流柜、变压器

表 10-9 电子管式超音频感应加热装置的型号及技术参数

设备型号	振荡频率 /kHz	输出 功率 /kW	振荡 功率 /kW	输入 功率 /kW	冷却 水量 /(L/h)	应 用	设 备 组 成
CHYP60-C2	30~40	50	60	100	3500	淬火、焊接	振荡柜、输出柜
CHYP100-C2	30~40	85	100	180	3500	淬火、焊接	振荡柜、输出柜
CHYP100-C3	30~40	85	100	180	4000	淬火、焊接	振荡柜、整流柜、调压 柜、输出柜、配电柜

3) 中频感应加热装置将 50Hz 的工频电流变为 0.5~10kHz 的交流电流，其分为机式变频装置、电磁式倍频器、晶闸管变频装置与离子管变频装置等。在生产中机式中频发电机的使用比较广泛。表 10-10 列出了机式中频变频装置的型号及技术参数。

表 10-10 机式中频变频装置的型号及技术参数

型 号	单相中频输出				三相工频输入			励磁 电压 /V	满载 效率 /(%)	耗水量 /(t/h)	外形尺寸： (直径/mm)× (高度/mm)
	功率 /kW	频率 /Hz	电压 /V	功率 因数	功率 /kW	电压 /V	功率 因数				
BPS-50/2500	50	2500	750/375	0.9	65	380	0.8	110/55	77	1.5	φ900×1200
BPSD-100/2500	100	2500	750/375	0.9	130	380	0.91	110/55	77	2.5	φ1000×1458
BPSD-100/8000	100	800	750/375	0.9	135	380	0.91	110/55	74	2.8	φ1000×1458
BPSD-160/2500	160	2500	750/375	0.9	208	380	0.91	110/55	77	3	φ1000×1558
BPSD-160/8000	160	8000	750/375	1.0	380	380	0.936	110/55	74	4	φ1000×1558

3. 感应加热设备的应用

感应热处理零件占汽车热处理零件的 70% 以上, 汽车零件的热处理离不开感应加热设备。作为一种可实现零件整体或局部热处理的淬火设备, 感应加热设备具有许多优点, 在汽车零部件制造行业应用十分广泛, 例如前面提到的典型零件感应淬火, 多应用于传递动力转矩的轴类零件: 内燃机气门的杆端与盘锥面、曲轴轴颈、凸轮轴、花键轴、齿轮齿圈、半轴、等速万向节、变速叉、传动器轴、十字轴、齿轮轴、减振器、销轴、轴承座、制动凸轮、转向节等。

10.6 流动粒子炉

1. 流动粒子炉的发展和特点

流动粒子炉是近 30 年发展起来的一种新型的热处理设备, 它有连续式炉和周期式炉两种。流动粒子炉是将固体粒子作为加热介质来实现对零件热处理的。炉膛内固体粒子被从炉膛底部多孔布风板供给的气体所吹拂, 在气流作用下形成紊流, 使其在炉膛内悬浮翻腾, 粒子之间失去接触, 相互冲击、混合和自由流动, 整个床层呈流态化状态。流动粒子与加热工件进行无规则的碰撞, 由于固体粒子的不断浮动, 可确保炉内温度均匀, 加上高温下与氧气的接触, 生成了具有中性或还原性的气体, 因此可完成零件在流态层中的加热、冷却或化学热处理等过程。

通入的气体具有两个作用, 一是使粒子形成流态化, 二是形成热处理气氛, 从而满足零件保护加热、渗碳、渗氮等热处理的工艺要求。一般通入的气体有四类: 空气为氧化性气体, 可用于不要求防氧化的外热式流动粒子炉和炭粒作流动粒子的流动粒子炉, 也可用作内热式流动粒子炉可燃气体的助燃剂; 氮气和氨基气氛常用于外热式流动粒子炉; 可燃气体通常为丙烷、丁烷、液化石油气、天然气或城市煤气等, 它们与空气按一定的比例混合产生不同燃烧程度的流态化气氛, 完成工件的热处理过程; 其他气体对外热式流动粒子炉而言, 可通入氨的裂解气、甲醇裂解气等。

流动粒子炉与其他气体加热介质、液体加热介质热处理设备相比具有以下特点:

1) 粒子的热导率大, 大于空气电阻炉及盐浴炉, 升温和加热速度快, 消耗气(电)量少。

2) 固体粒子不断沸腾, 保证了炉膛内温度的均匀, 温差小, 零件变形小, 粒子对零件无腐蚀性, 加热温度范围宽 (800 ~ 1000℃)。

3) 设备简单, 起动方便, 易于实现设备的自动化和机械化操作, 可实现设备的定时开时停操作。

4) 设备简单, 热效率高和节能效果显著, 成本低廉及操作安全。

5) 处理后的零件表面清洁光亮, 不需要清洗和擦拭, 零件无氧化、脱碳, 免去了脱氧、捞渣等工序。

6) 应用范围广, 用于完成零件的淬火、回火、固溶处理和时效、去应力退火及多种化学热处理等。

其缺点是需要配备通风、吸尘装置, 一次性投资大; 介质的消耗大, 需要及时补充粒子, 有砂或石墨 (或三氧化二铝) 粒子在炉内飞散, 污染环境; 零件加热时带电, 应采取绝缘措施。

2. 流动粒子炉的类型和结构

按热源、加热方式及粒子流态化方式的差异, 流动粒子炉分为电加热式和气体加热式两种, 而电加热式又分为内热式和外热式两种。内热式流动粒子炉由炉体系统 (流态床、电极、炉体)、供电控制系统 (变压器、控制柜、热电偶和控温仪表)、通风系统 (气泵、流量计、调节阀等) 和除尘回收系统 (旋风除尘粒子回收器、风机等) 组成。目前我国有 RSL、TH、T、LTR 等型号的流动粒子炉, 其基本类型有直接电阻加热式、外部电阻元件加热式、内部电阻元件加热式、内部燃烧加热式和外部燃烧加热式等几种, 这里主要介绍如下两类。

(1) 气体燃料加热流动粒子炉 自炉膛底部通入一定流量的气体燃料加热固体粒子, 使固体粒子在炉膛内悬浮翻腾, 粒子呈流态化状态, 从而完成零件的加热和冷却。图 10-14 所示为气体燃料流动粒子炉的结构示意图。

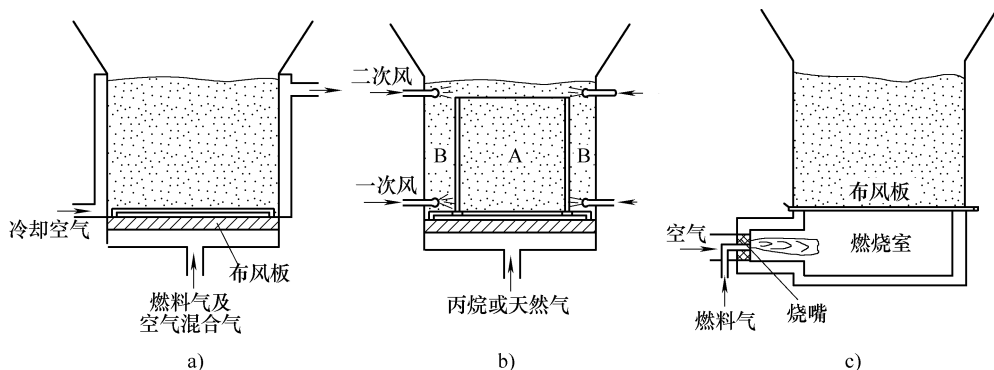


图 10-14 气体燃料流动粒子炉的结构示意图

a) 内热式 b) 间接加热式 c) 外燃式

选用的加热粒子有刚玉砂、镁砂、锆砂、硅砂、金属微粒、石墨粒子、粘土砖等非金属性颗粒以及导电性粒子炭粒。耐火材料颗粒如刚玉 (主要成分为 Al_2O_3) 为中性粒子, 与气氛不反应, 具有耐高温性能和耐磨性; 而氧化铝空心球的密度

小, 利于降低初始化速度, 且易均匀流态化。内燃式流动粒子炉的煤气与空气混合后, 通过布风板、透气砖、耐热砂送入炉膛内, 形成还原性燃烧气流, 粒子沸腾并被加热, 必要时可通过冷却空气调节炉内温度。可供气体渗碳的粒子炉, 炉膛分内外两层, A 层为炉膛, B 层为加热室。丙烷或天然气从底部进入工作炉膛, 使粒子沸腾, 分裂成具有渗碳作用的气氛; 另一部分燃气进入燃烧室内, 与引入的一次空气燃烧来加热炉膛。外燃式流动粒子炉的炉体底部燃烧室内安装一个过剩空气烧嘴, 其中的火焰气流通过透气砖进入炉膛内, 加热后使粒子沸腾, 调节燃料气供气量可控制炉膛内的温度, 其热效率比内燃式高。

气体燃料加热流动粒子炉具有加热和流态化的双重效果, 从炉型结构、安全操作、炉气成分的调节上应特别注意。目前用液化石油气或天然气的流动粒子炉已批量生产, 采用液化石油气和空气混合物为燃料, 加热介质为 Al_2O_3 空心球或颗粒。

(2) 内热式电加热流动粒子炉 该类粒子炉有电极式和电热元件式两种, 一般采用石墨或碳化硅、焦炭等作为加热介质, 它们在流态床层中既能加速传热又能提高传热效果, 起到发热体的作用。它们不仅起到加热介质的作用, 而且在高温下能与氧结合形成 CO 气氛, 具有保护零件免受氧化和脱碳的作用, 故可实现零件的无氧化、无脱碳加热。电极式采用侧壁上的电极和碳粒子导电进行加热, 碳粒子为加热介质、导体和发热体, 炉膛的四角装有进气管, 起到辅助流化的作用。图 10-15 所示为电加热流态床的结构。

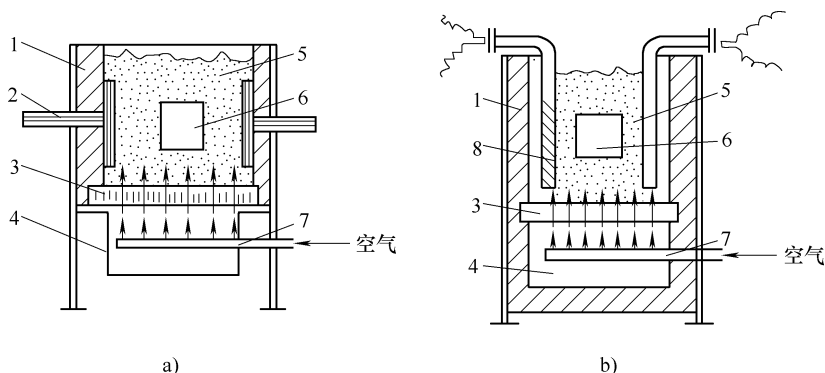


图 10-15 电加热流态床的结构

a) 电极式 b) 电热元件式

1—炉体 2—电极 3—布风板 4—风室 5—沸腾层 6—工件 7—风管 8—加热体

目前热处理企业大多使用电极加热流动粒子炉, 它们的结构如下。

1) 风室和进气管。风室的作用是确保空气在进入透气板前具有足够的压力和分布均匀, 保证炉内粒子的流态化质量。为了改善气流在布风板上压力的分布

状态,风室及进气管的分布应根据要求改变空气流向,进气管上的出口应均匀分布。

2) 布风板作为一种重要的炉内构件,具有均匀透气性好,耐热性、耐磨性和抗压性好,热稳定性好,不变形等特点,可起到阻挡粒子下漏到风室和防止透气孔堵塞的作用。布风板可用金属板或非金属材料制作,大多用高铝透气砖或金属板钻孔制成。

3) 耐热砂层具有重要的作用。炉子在工作过程中,为保护布风板免受早期损坏,在其上覆盖一层50~70mm、粒度为20~30目或40~60目的耐热砂层,多采用刚玉、镁砂等。耐热砂层可保持气体压力的均匀。

4) 流态化粒子形成流态床和起到传导的作用。粒度的大小十分关键,直径小于1mm,加热速度快,表面积增加,有利于导热和加热零件;若直径大于1mm,则质量大难于实现流态化;直径在0.45mm以下时,会与加热气体“粘附”,无法实现零件的加热。粒度过大或过小均会影响加热的效果,严重的将产生沟流、气泡、节涌等,因此要加以控制。下面介绍常用的电加热内热式流动粒子炉,如图10-16所示。

在该类流动粒子炉中,要求导

电粒子具有下列特点:电阻率及电阻温度系数小;质量轻和杂质少;耐热温度高,粒度均匀;在高温下与氧结合形成保护性的一氧化碳气氛。

另外液化石油气流动粒子炉也是目前使用的设备,该炉具有升温速度快,炉膛内温度均匀,工作温度在750~1300℃,不完全燃烧形成还原性和微氧化性气氛,与放热性气氛相近,零件在加热过程中无氧化脱碳,通入丙烷气体可进行渗碳处理等特点。它是目前应用较广的炉型,其比例占流动粒子炉数量的1/3。

3. 流动粒子炉与其他热处理设备技术指标的比较

流动粒子炉作为一种新型的热处理设备具有其固有的特性,它是随着科学技术的发展和能源短缺问题的日益严重而出现的,具有其他设备所不可替代的特点。流动粒子炉与其他热处理设备各项技术指标的对比见表10-11。

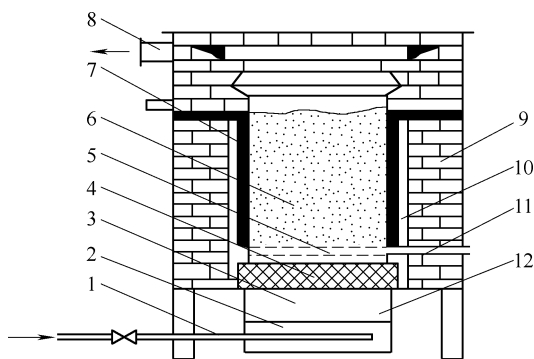


图 10-16 RL 系列流动粒子炉结构示意图

- 1—进气管 2—下气室 3—上气室 4—透气砖
5—耐热砂 6—石墨粒子床 7—电极板 8—排烟口
9—轻质保温砖 10—炉膛
11—辅助进气管 12—布风板

表 10-11 流动粒子炉与其他热处理设备各项技术指标的对比

技术 指 标		流动粒子炉	盐浴炉	真空炉
性能	零件的加热速度	快	很快	很慢
	温度的均匀性	好， $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以下	好， $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以下	最好， $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以下
	使用温度范围	$20 \sim 1150^{\circ}\text{C}$	取决于盐浴种类（一般在 $750 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ ）	$150 \sim 1350^{\circ}\text{C}$
操作性	热处理周期	短，渗碳、渗氮速度快	短，渗碳、渗氮速度快	一般
	冷炉起动	快	熔化时间长	升温慢
	后处理工序	除粘附的氧化铝颗粒	清洗残盐	不需要清理
	维修及操作	需清除炉体周围及淬火氧化铝颗粒	更换盐浴	维持真空系统
产品质量	晶界氧化	无	无	无
	零件的光亮度	稍差	易脱碳	良好
	变形	小	小	最小
环境	车间环境	应设吸尘罩	环境稍差	环境好
	污染	稍有污染	有污染	无污染
	安全性	安全	有盐溶液飞溅危险	安全
经济性	最初投资	便宜	较便宜	大
	生产成本	低	高	稍高
	辅助装置	供气装置	起动、清理盐渣和排废水	供气冷却系统

4. 流动粒子炉的发展与应用

(1) 流动粒子炉的发展方向 流动粒子炉具有上述优点，因此其应用范围自 20 世纪 80 年代如雨后春笋般迅速扩大。为了节省流态化气体流量，使部分炉气循环使用，采用一个喷射泵从炉口排出气体，使之进行循环回收再利用。

采用此方法具有几个优点：节省气源，降低了生产成本；回收炉气的热量，供再次加热零件，起到预热零件的作用；加快了加热速度，缩短加热时间，提高了生产率；处理后的零件具有高的疲劳强度和抗弯强度，提高了零件的使用寿命。

现在逐渐发展有脉冲流动粒子炉，实现了粒子炉的科学控制。

(2) 流态化化学热处理和冷却介质的应用 事实证明经过流动粒子炉处理的

工件, 表面呈现高的压应力状态, 这同粒子在加热炉内不断反复撞击工件有很大的关系。挤压模具、压铸模具、锻造模具等经热处理后, 使用寿命提高 3 ~ 10 倍, 原因在于流动粒子的高速运动和撞击, 将热量和动能完全传给了工件, 使工件表面获得了压应力作用, 故提高了使用寿命。

10.7 离子渗氮炉

离子渗氮是利用低真空辉光放电原理, 使氢、氮离子轰击工件表面而升温, 即利用高压电场在稀薄的含氮气体中引起的辉光放电进行渗氮的一种化学热处理方法, 又称辉光离子渗氮和离子轰击渗氮。离子渗氮炉还可进行渗硫、氮碳共渗、硫氮共渗、碳氮共渗等化学热处理。根据炉体的形状, 离子渗氮炉可分为钟罩式炉、井式炉和卧式炉等, 其中以钟罩式炉和井式炉应用较多。

1. 离子渗氮炉的结构与特点

离子渗氮炉由炉体 (渗氮工作室)、真空系统 (抽真空和真空测量系统)、渗氮介质供给系统、供水系统、电力控制系统和温度测量及控制系统等组成。一般零件多采用钟罩式炉进行处理, 钟罩式离子渗氮炉如图 10-17 所示。

渗氮介质供给系统包括气源、通气管路、干燥净化及流量测量等装置, 应保证通入炉内的渗氮气体的纯度和水分含量符合要求。

炉体与真空炉相似, 具有双层水冷的圆筒形结构, 内壁比外壁厚, 内壁用 6 ~ 8mm 的不锈钢板或普通钢板焊成, 外壁用 3mm 的碳素钢板围成, 炉底用 8 ~ 10mm 的钢板制作。工件置于与炉床绝缘但又连接在一起的阴极托盘上, 阴极托盘结构如图 10-18 所示, 长杆形工件可用图 10-19 所示的结构吊挂。

阴极装置有良好的绝缘性、密封性、耐高温性。渗氮时工件经常处于 500 ~ 600℃ 或更高温度, 为了减少热损失, 炉内应设置隔热屏。绝缘材料与阴极辉光接触部位应采用间隙屏蔽装置, 以防产生弧光, 这利用了辉光在小于 1mm 的缝隙中即会熄灭的原理, 在二者接触部分加上金属套。

阳极一般借用炉壳, 也可在炉内加装隔热屏或辅助阳极 (内阳极), 由接线柱引到炉外, 阴、阳极距离应大于 20mm。炉壳与炉底的接触部位用真空橡胶圈密封, 应采用水套进行冷却, 其他部位用螺钉将真空橡胶圈压紧。

2. 离子渗氮炉的基本原理

将真空室内的真空度抽至 $(1 \sim 5) \times 1.33 \text{ Pa}$, 充入少量气体介质氨气或氮气、氢气的混合气体, 电源使室内压强保持 $(1 \sim 10) \times 133 \text{ Pa}$, 真空室内有阴、阳两极, 工件接在阴极, 外围设置一个阳极 (炉罩), 如图 10-20 所示。

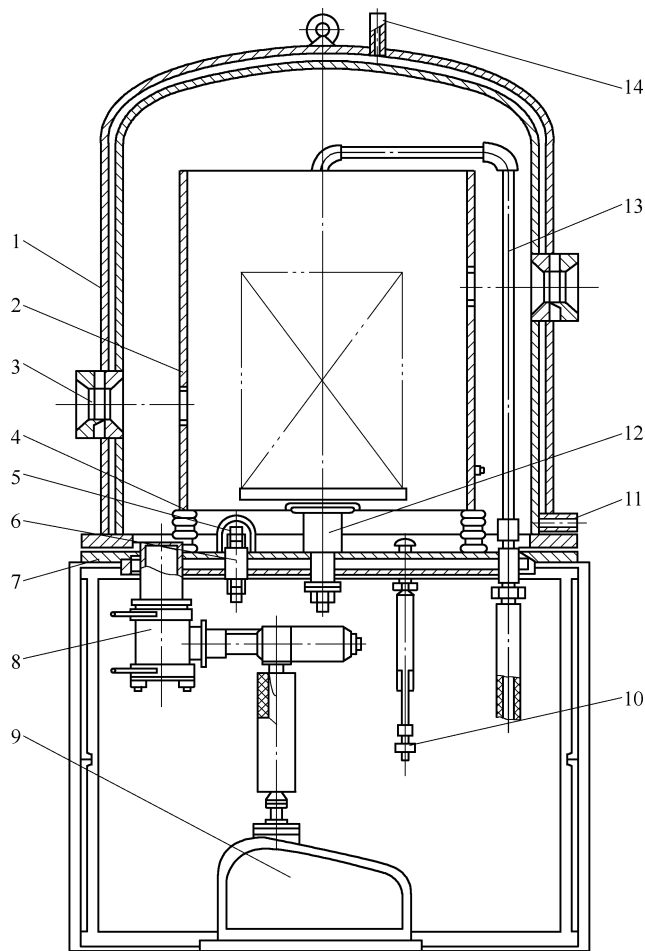


图 10-17 钟罩式离子渗氮炉

1—双层炉体 2—内阳极 3—观察孔 4—瓷绝缘子 5—屏蔽帽 6—阳极接线座 7—底盘 8—抽气系统
9—真空泵 10—电阻真空规管 11—出水管 12—阴极托盘装置 13—进氮气管 14—进水管

在阴、阳两极通直流电后，氨气在高压电场作用下部分分解成氮以及电离成氮离子及电子，阴极（工件）表面形成一层紫色辉光，高能量的氮离子轰击工件表面，动能转为热能使工件表面温度升高。

图 10-21 所示为辉光放电的电流电压曲线。从图中可以看出，在炉内压力稳定的条件下，开始两极间只有十分微弱的电流产生，随着电压增大电流增大，电压增大到 D 点时，气体电离，由绝缘成为良导体，阴极的部分表面开始起辉， D 点电压为起辉电压，但此时两极间的电压与电流不成线性关系，如 EF 线所示。升高电源电压或减小电阻均不会改变电压，电流密度也不变化，该区为正常辉光放电区。辉光覆盖面积逐渐增大，电流也相应增大，其大小与炉内气体压力有关，至 F 点

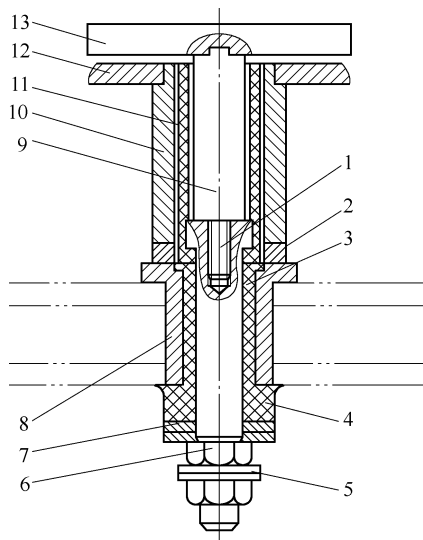


图 10-18 阴极托盘结构

1—下阴极柱 2—套圈 3—上绝缘套 4—下绝缘套
5—垫圈 6—螺母 7—大垫圈 8—套 9—上阴
极柱 10—金属套 11—屏蔽套 12—间隙屏蔽套
13—阴极板

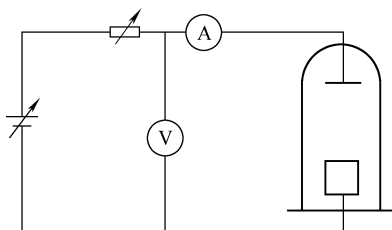


图 10-20 辉光放电电路

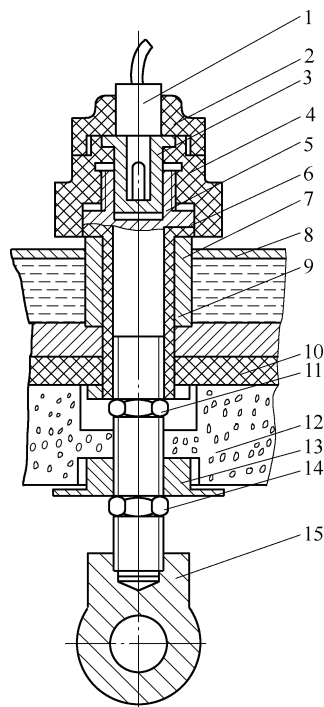


图 10-19 阴极吊钩结构图

1—阴极引线插头 2、4—聚四氟乙烯保护
套 3—引线插座 5—引线接线柱 6—橡
胶密封垫 7—隔水套管 8—炉顶冷
却水套 9—绝缘套 10—石棉水泥绝缘垫
11、14—螺母 12—泡沫刚玉保温板
13—间隙屏蔽板 15—阴极吊环

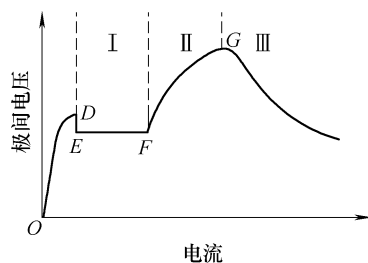


图 10-21 辉光放电的电流电压曲线

I—正常辉光放电区 II—异常辉光放电区
III—弧光放电区

辉光覆盖了工件表面, 升高电源电压则电压与电流均增大, 直到 G 点, FG 段称为异常辉光放电区。离子渗氮主要在此区间进行, 放电电压与电流成线性关系, 过了 G 点电压下降, 电流迅速增大, 会烧化工件。

气体的起辉电压是一个重要参数, 它直接影响到工件的产品质量。一般当气体成分、阴极材料不变化时, 其取决于炉内气体压强 p_0 与阴、阳两极距离 d_0 的乘积。工件表面的油污、氧化物等被强烈地溅射而除去, 氮的正离子在阴极夺取电子后逐渐成为氮原子被工件表面吸收, 并向内扩散。氮离子冲击工件表面还能产生阴极溅射效应, 在离子轰击作用下从阴极表面上冲出铁离子, 在等离子区与氮离子和电子结合形成渗氮物, 其以均匀的层状被吸附在阴极表面上, 形成氮浓度很高的渗氮铁 (FeN)。在离子轰击和热激活作用下, 沉积在工件表面的 FeN 发生反应 $\text{FeN} \rightarrow \text{Fe}_2\text{N} + [\text{N}]$, 分解后产生的活性氮原子被工件表面吸收并向内扩散, 而 Fe_2N 又受到上述作用依次发生下列反应: $\text{Fe}_2\text{N} \rightarrow \text{Fe}_3\text{N} + [\text{N}]$, $\text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_4\text{N} + [\text{N}]$ 及 $\text{Fe}_4\text{N} \rightarrow \text{Fe} + [\text{N}]$, 其中放出的氮原子渗入工件表面, 向工件内部扩散, 在工件表面形成渗氮层。随着时间的延长, 渗氮层逐渐加深。离子渗氮是在真空容器内高压电场作用下进行的, 离子渗氮时阴极的溅射作用除掉了氧化膜, 可使工件的表面始终处于活化状态, 因此有利于氮原子的渗入, 同时由于离子轰击会在表面一定深度内产生晶体缺陷 (如产生位错等), 其方向与氮原子的扩散方向一致, 有利于氮原子的扩散。在渗氮层中氮在高浓度的 ε 相中扩散最慢, 而 ε 相又处于最表面, 在扩散层中氮原子的扩散起着至关重要的作用, 离子渗氮时辉光放电对表面层发生作用, 因此有助于 ε 相中氮原子的扩散, 加速了渗氮过程。由此可见在离子渗氮过程中辉光放电对形成渗氮扩散层具有重要作用: 活化气相, 加快氮原子的吸附和扩散。

3. 离子渗氮炉的工艺参数

(1) 真空度 空气在渗氮过程中会使金属表面氧化, 影响渗氮质量, 故真空度一般抽至 $(1 \sim 5) \times 1.33\text{Pa}$ 才能送电起辉。

(2) 气体成分 一般采用氨气, 也可用氮和氢的混合气体。改变氮和氢的比例, 可使渗氮层的结构和 ε 相层的厚度发生变化, 氢气所占的比例越大, 则渗氮层中 ε 相层越薄。

(3) 气体压力、气体流量与真空泵的抽气率 它们为相互关联的三个参数, 在气压一定的条件下, 真空泵的抽气率越大, 氨气的消耗量越大。气压对电流密度有直接的影响, 气压增大电流密度加大, 同时又影响到升温速度和保温温度。气压在 $(1 \sim 10) \times 133\text{Pa}$ 范围内时, 对渗氮层的质量基本无影响。

(4) 电流密度 根据渗氮温度的要求来选择电流密度, 通常遵循下列原则: 升温阶段, 电流密度需要大一些, 加快升温速度; 在保温阶段, 能量消耗低, 电流密度可以小一些。电流密度在 $0.5 \sim 20\text{mA}/\text{cm}^2$ 变化对渗氮层的质量没有明显影响, 常用 $0.5 \sim 15\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

(5) 阴、阳两极之间的距离 两极间的距离大于辉光厚度就可以维持辉光放电, 两极间的距离以 30 ~ 70mm 为宜。

(6) 辉光电压 离子渗氮所需电压与电流密度、炉内气压、工件表面的温度、阴阳两极间的距离等诸多因素有关。一般通过调节电压和气压来达到一定的温度, 在上述参数保持不变的前提下, 气压增大, 则电压下降; 而电压升高, 会造成电流密度增大。一般保温阶段常用的电压为 500 ~ 700V, 其表面功率密度为 0.2 ~ 0.5W/cm²。

(7) 渗氮温度和保温时间 渗氮温度和保温时间是离子渗氮的重要工艺参数, 对渗氮层的质量影响很大。450℃ 离子渗氮后表面硬度很高, 形成了弥散度很大、与基体相共格的合金渗氮物, 在不形成化合物层的条件下, 改变渗氮炉内的氮、氢比例, 可调整渗氮层硬度。根据钢种的不同, 离子渗氮温度通常在 450 ~ 650℃ 范围内选择, 但要低于钢调质时的回火温度 30 ~ 50℃。渗氮层厚度为 0.2 ~ 0.6mm 时, 渗氮时间为 8 ~ 30h。

4. 离子渗氮炉的应用

1) 热作模具钢和冷作模具钢模具的渗氮。热锻模要求有热稳定性、良好的韧性、高的耐磨性, 又要有低的粘附性及热裂不敏感性。对锻模而言, 磨损为主要的失效原因, 采用有一层 4 ~ 6μm 厚的 γ 渗氮层和约 0.3mm 的扩散层结构, 可获得良好的效果, 锻模离子渗氮可使成形面的粘着性降低, 使热疲劳强度和冲击韧度提高, 因而使用寿命延长。对于热拉深模而言, 可得到韧性好和耐磨的化合物层, 减小了摩擦因数, 使受力层的磨损减少。钢压铸模具、铝挤压模具离子渗氮后可提高寿命 2 ~ 3 倍。冷作模具除要求有足够的心部强度外, 还要求表面耐磨且脆性小, 其基体中碳化物含量高, 离子渗氮后的表面硬度高, 具有高的耐磨性, 非常适合冷作成形加工工艺使用, 如卷板、轧制、冲裁、拉深和弯曲等。如用 Cr12MoV 钢制造的蜗壳拉深成形模, 500℃ × 5h 离子渗氮, 表面硬度为 1200HV5, 化合物层厚度为 0.015mm, 渗层深度为 0.12mm, 使用寿命提高 25 倍。

2) 汽车发动机零件的渗氮。在发动机上工作的零件, 要求具有高的硬度, 良好的疲劳强度, 较高的抗咬合性和耐摩擦能力。进(排)气门、导管、挺杆、曲轴、活塞环等进行离子渗氮均取得了良好的效果。例如, 45 钢制造的曲轴离子渗氮 1 ~ 2h, 表面硬度、耐磨性及疲劳强度提高, 防止了变形。

3) 不锈钢和耐热钢零件的渗氮。对于需要渗氮的不锈钢和耐热钢制品, 采用离子渗氮的方法效果特别好, 辉光放出离子的高速轰击作用, 可以清除掉工件表面的钝化膜, 因此渗氮前不用特别地进行钝化膜处理, 离子渗氮速度快, 且渗氮层均匀。例如, 20Cr13 在 550℃ × 15h 渗氮后渗层为 0.2mm, 硬度为 1100 HV0.2; 12Cr18Ni9 在 580℃ × 48h 渗氮后渗层深为 0.1mm, 硬度为 1000 HV0.2。与结构钢相比, 不锈钢和耐热钢中含有较多的合金元素, 它们阻碍氮原子的扩散, 使渗氮速

度减慢,故渗氮层的厚度变薄,尤其是氮原子在不锈钢中扩散系数较小。

5. 离子渗氮炉的发展

随着科学技术的不断发展,离子渗氮炉因其有许多优于气体渗氮炉的特点,在实际生产中得到了不断改进。

1) 卧式离子渗氮炉。该炉较长,具有加热元件、机械出装炉装置,可实现机械化生产,提高了生产率,极大地改善了工人的劳动条件。

2) 多功能离子加热装置。该炉是在多用真空炉的基础上加以改进的。由于加热室内为真空状态,没有工件的氧化和其他的影响,因此可用于进行离子的渗氮、渗碳、氮碳共渗或碳氮共渗等化学热处理,同时还可作为加热设备进行真空淬火、回火、退火、烧结、堆焊等。目前已发展了水平较高的化学离子渗氮炉,其有保温和加热装置,该炉型设计合理,操作十分方便。

3) 双重加热离子渗氮炉。该炉依靠高能离子轰击加热工件,同时还可用电热元件的辐射和热气对流来加热工件,可缩短生产周期,节能降耗,热效率高。其结构与真空回火炉相同,真空室内两侧设置有加热元件,强力风扇循环系统可保证炉内的介质气体对工件的加热均匀一致。用中性气体加热工件后,将中性气体抽出然后通入介质工作气体(氨气),再依靠离子轰击工件表面,从而保持了工件温度和渗氮效果。

参 考 文 献

- [1] 孟繁杰,黄国靖. 热处理设备 [M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [2] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册:第3卷 [M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 吉泽升,张雪龙,武云启. 热处理炉 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.
- [4] 包耳,田绍洁. 真空热处理 [M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2009.
- [5] 曾祥模. 热处理炉 [M]. 西安:西北工业大学出版社,1989.
- [6] 史玉芳. 热处理工 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [7] 王忠诚,孙向东. 汽车零部件热处理技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [8] 陈永勇. 可控气氛热处理 [M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [9] 阎承沛. 真空与可控气氛热处理 [M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [10] 赵德寅,王大伦. 汽车零件金相分析 [M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [11] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册:第2卷 [M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2008.
- [12] 纳门伊 R. 可控气氛热处理 [M]. 杜豪年,杨春澍,译. 北京:宇航出版社,1988.
- [13] 樊东黎,徐跃明,佟晓辉. 热处理工程师手册 [M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [14] 朱元浦,侯增寿. 金属热处理问答 [M]. 北京:机械工业出版社,1993.

- [15] 钟华仁. 热处理质量控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [16] 吴光英. 现代热处理炉 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [17] 潘月琴, 张子慈. 五金刃口产品的热处理 [M]. 北京: 轻工业出版社, 1982.
- [18] 王忠诚, 李扬, 尚子民. 钢铁热处理 500 问 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [19] 王忠诚, 齐宝森, 李扬. 典型零件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [20] 马鸣图. 先进汽车用钢 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [21] 李泉华. 实用热处理技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [22] 王忠诚, 马晓谦, 谢春生. 奥氏体钢气阀固溶处理用的燃气炉 [J]. 热处理技术与装备: 2010, 31 (3): 63-66.
- [23] 杨满. 实用热处理技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [24] 雷廷权, 傅家骥. 金属热处理工艺方法 500 种 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [25] 郭铮匀. 钢的渗氮 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [26] 刘永铨. 钢的热处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981.
- [27] 潘邻. 表面改性热处理技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.



本书立足于我国汽车制造行业零件热处理的现状，以关键汽车零件的热处理实用技术为全书的主线，从工作条件、材料选用、热处理的具体要求、设备选择等分类方面进行了详细的介绍。

本书内容丰富、图文并茂，注重与实践相结合，是一本实用性很强的热处理技术书籍。

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

社服务中心：010-88361066

销售一部：010-68326294

销售二部：010-88379649

读者购书热线：010-88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术 / 机械工程 / 热处理

ISBN 978-7-111-41987-7

策划编辑◎陈保华

ISBN 978-7-111-41987-7



9 787111 419877 >

定价：49.00元